

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie

VALORISATION DES COQUILLES DE PALOURDE ET DU SABLE DE DRAGAGE DANS LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Chiraz DJEBALI

Jury:

Patrice RIVARD (Directeur)
William WILSON (Rapporteur)
Tikou BELEM (Evaluateur)

RESUMÉ

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la valorisation des coquilles de palourde et du sable de dragage provenant des Îles De la Madeleine (IDM). Notre vision consiste à proposer des formulations de matériaux cimentaires alternatifs à base de ces matières résiduelles, dans une logique d'économie circulaire, permettant la réduction de l'impact environnemental du ciment et la dépendance aux matières premières conventionnelles. A cet effet, l'objectif était de fabriquer des pâtes de ciment et des mortiers simples et économiques, sans avoir recours à des adjuvants chimiques pour améliorer les performances des mélanges. Pour ce faire, la résistance à la compression uniaxiale a été fixée comme étant la propriété primordiale pour optimiser les formulations.

La première partie a été consacrée à la formulation des pâtes de ciment afin d'étudier le potentiel de valorisation de la poudre de palourde pour remplacer partiellement le ciment. En effet, la caractérisation chimique de cette poudre a montré qu'elle est majoritairement composée de carbonate de calcium ce qui justifie son utilisation comme un filler calcaire dans le ciment. On a choisi de faire varier trois paramètres principaux qui sont le taux de remplacement de la poudre de palourde dans le ciment, la taille des particules de cette poudre et l'effet de la calcination sur le développement des résistances. Les résultats ont montré que :

- Le remplacement partiel du ciment par la poudre brute (5%, 10% et 15%) a engendré une diminution des résistances des pâtes par rapport aux témoins. Cela a ramené à suggérer 5% comme le taux de remplacement le plus approprié.
- La calcination de la poudre à 800°C a permis d'atteindre des résistances des pâtes similaires à celles des mélanges de référence. Donc 5% a été suggéré comme le taux de substitution de la poudre calcinée le plus approprié.
- La variation de la taille des particules de la poudre brute dans les pâtes de ciment ($D < 80 \mu\text{m}$, $D < 160 \mu\text{m}$ et $D < 315 \mu\text{m}$) a montré que l'hydratation était plus rapide à 7 jours pour les mélanges contenant les poudres les plus fines. Toutefois, cette variation n'a pas eu d'effet sur le développement des résistances à 28 jours. En outre, l'observation au MEB des échantillons des pâtes a montré l'absence de réactions chimiques entre la poudre de palourde et les produits d'hydratation.

La deuxième partie de ce projet de recherche a porté sur la formulation des mortiers. Les résultats ont montré que :

- Le remplacement partiel du ciment (5%, 10%) par la poudre non calcinée a induit une diminution des résistances des mortiers contenant 100% de sable de dragage, par rapport aux témoins. Donc, 5% a été proposé comme le taux de remplacement le plus approprié.

- Le remplacement du sable naturel (50% et 100%) par les coquilles de palourde concassées, tout en substituant 5% du ciment par la poudre de palourde brute a engendré une diminution significative de la résistance. Donc, la substitution du sable ordinaire par les coquilles de palourde concassées ne semble pas viable.

Ce travail constitue une initiation permettant d'évaluer le potentiel de valorisation des coquilles de palourde des IDM pour la production des matériaux cimentaires locaux alternatifs.

Mots clés: Coquilles; Sable de dragage; Matériaux cimentaires; Résistance à la compression; Valorisation; Remplacement; Ciment; Granulats fins

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche M. Patrice Rivard. Je le remercie de m'avoir orienté, aidé, conseillé, encouragé et d'être si compréhensif.

Je tiens à remercier CERMIM pour nous avoir fourni les coquilles et pour avoir initié ce projet de recherche et FRQNT pour le financement de ce travail.

Merci à Mitacs Globalink pour m'avoir donné cette belle opportunité de poursuivre mes études supérieures au Canada.

Je remercie les membres du Jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mes ami(e)s et mes collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel inestimable.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sur une note plus personnelle, je remercie infiniment mes très chers parents, mon frère et mon amoureux qui ont toujours cru en moi et n'ont pas cessé de m'encourager pour dépasser toutes les épreuves. Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien exceptionnel malgré la distance qui nous sépare.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
1.1. Mise en contexte et problématique	1
1.2. Objectifs du projet de recherche	2
1.3. Structure de mémoire.....	3
2. REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1. Introduction	4
2.2. Valorisation des coquilles de mollusques dans le béton	5
2.3. Valorisation des sédiments de dragage dans le béton	28
3. MÉTHODOLOGIE	32
3.1. Programme expérimental	32
3.2. Description des procédures expérimentales	33
4. RÉSULTAS ET LEUR INTERPRÉTATION	46
4.1. Introduction	46
4.2. Caractérisation de la poudre de palourde brute et calcinée	46
4.3. Formulations des pâtes de ciment.....	53
4.4. Formulations des mortiers.....	60
5. DISCUSSION DES RÉSULTATS	63
6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	67

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Coquilles concassées (Nguyen et al., 2017)	7
Figure 2.2. Coquilles d'huître concassées utilisées comme granulats grossiers (Eo & Yi, 2014)	7
Figure 2.3. C-S-H externe cristallisé par précipitation (Tagnit-Hamou, 2013)	9
Figure 2.4. Cristaux de portlandite (Tagnit-Hamou, 2013)	9
Figure 2.5. Cristaux d'ettringite dans une pâte de ciment hydraté à l'âge de 3 jours (Tagnit-Hamou, 2013).....	10
Figure 2.6. Cristaux monosulfoaluminate (Tagnit-Hamou, 2013).....	10
Figure 2.7. Images au MEB: (a) le carboaluminate de calcium et l'ettringite développés dans des mélanges de ciment hydraté avec de la poudre de coquilles, et (b) l'ettringite développée dans un mélange 100% ciment (Wang et al., 2019)	12
Figure 2.8. Photos MEB montrant que la poudre d'huître servait comme un filler calcaire: a) 0 % poudre d'huître b) 10% poudre d'huître (Zhong et al., 2012).....	13
Figure 2.9. Temps de prise du béton ordinaire et du béton contenant 4% de poudre de coquilles dans le ciment (Olivia et al., 2017).....	14
Figure 2.10. Masse volumique totale du béton ordinaire et du béton aux coquilles (Olivia et al., 2017).....	15
Figure 2.11. Variation de l'affaissement avec le taux de remplacement des granulats grossiers (Eo & Yi, 2014)	16
Figure 2.12. Variation de l'affaissement avec le taux de remplacement des granulats fins (Eo & Yi, 2014).....	17
Figure 2.13. Résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de palourde (Lertwattanakul et al., 2012)	18
Figure 2.14. Coquilles de palourde broyées (<i>Anadara Granosa</i>) (Sandjaya et al., 2019)	18
Figure 2.15. Résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de palourde (<i>Anadara Granosa</i>) pour le mélange 1 (Sandjaya et al., 2019)	19
Figure 2.16. Résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de palourde (<i>Anadara Granosa</i>) pour le mélange 2 (Sandjaya et al., 2019)	19

Figure 2.17. Résistance à la compression du béton ordinaire et du béton contenant 4% de la poudre de coquilles à 7, 28 et 91 jours (Olivia et al., 2017).....	21
Figure 2.18. Résistance à la compression des mortiers contenant les coquilles concassées (Chin-Peow et al., 2015).....	23
Figure 2.19. Résistance à la compression des mortiers contenant les coquilles de coque (Edalat-Behbahani et al., 2019)	23
Figure 2.20. Résistance à la compression à 28 jours du béton en fonction du taux de remplacement du sable par les coquilles de palourde (Yusof et al., 2011).....	24
Figure 2.21. Résistance à la compression du béton contenant des granulats fins de coquilles à différents taux de remplacement (Eziefula et al., 2018)	25
Figure 2.22. Résistance à la compression du béton contenant des granulats grossiers de coquilles à différents taux de remplacement (Eziefula et al., 2018).....	25
Figure 2.23. Résistance à la traction du béton ordinaire et du béton aux coquilles (Olivia et al., 2017).....	27
Figure 2.24. Résistance à la traction à 28 jours du béton contenant des granulats de coquilles à différents taux de remplacement (Eziefula et al., 2018)	27
Figure 2.25. Les objectifs du dragage.....	29
Figure 3.1. Diagramme du programme expérimental	32
Figure 3.2. Sable de dragage non contaminé des IDM	33
Figure 3.3. Observations au MEB du sable de dragage des IDM (Safhi, 2020)	33
Figure 3.4. Les coquilles de palourde des IDM.....	34
Figure 3.5. Broyeur à boulets	34
Figure 3.6. Lubrification des moules cubiques de dimensions 50x50x50 mm	36
Figure 3.7. Mélanges de pâtes de ciment	36
Figure 3.8. Moulage des mélanges de pâtes.....	37
Figure 3.9. Effet de la taille des particules de la poudre de palourde brute sur les mélanges de pâtes de ciment.....	38
Figure 3.10. Calcination de la poudre de palourde dans le four.....	39
Figure 3.11. Microscope électronique à balayage	40

Figure 3.12. Confection des mélanges de mortiers	41
Figure 3.13. Mélanges de mortiers à base de sable de dragage.....	42
Figure 3.14. Les coquilles de palourde concassées utilisées.....	43
Figure 3.15. Mélanges de mortiers en utilisant les coquilles palourde concassées	44
Figure 3.16. Essai de compression uniaxiale sur des cubes	45
Figure 4.1. DRX de la poudre de palourde brute	47
Figure 4.2. DRX de la poudre de palourde calcinée	47
Figure 4.3. Analyse granulométrique de la poudre de palourde par tamisage	50
Figure 4.4 Courbe granulométrique de la poudre de palourde.....	51
Figure 4.5. Courbe granulométrique des coquilles de palourde, du sable naturel et les courbes limites selon la norme ASTM C33.....	52
Figure 4.6. Variation de la résistance à la compression des pâtes de ciment en fonction de la durée de murissement et du taux de remplacement de la poudre de palourde brute non tamisée.....	54
Figure 4.7. Résistance à la compression des pâtes de ciment en fonction de la durée de murissement et de la classe granulométrique de la poudre de palourde.....	55
Figure 4.8. Variation de la résistance à la compression sous l'effet de la taille des particules de la poudre de palourde en fonction de la durée de murissement.....	56
Figure 4.9. Photos du MEB de quelques phases d'hydratation dans la pâte de ciment.....	57
Figure 4.10. Photos du MEB des échantillons de poudres de coquilles	58
Figure 4.11. Résistance à la compression des pâtes de ciment contenant la poudre calcinée, en fonction de la durée de murissement et du taux de remplacement de la poudre de palourde...	59
Figure 4.12. Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge et du taux de remplacement de la poudre de palourde non calcinée	61
Figure 4.13. Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux du remplacement du sable naturel par les coquilles concassées	62
Figure 4.14. Mortiers contenant 100% de sable de coquilles.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Travaux de recherche sur l'incorporation des coquilles de mollusques	4
Tableau 2.2. Composition chimique du ciment Portland et des coquilles (Mohammad et al., 2017).....	5
Tableau 2.3. Propriétés physiques du ciment Portland et des coquilles	6
Tableau 2.4. Propriétés physiques des huîtres pour remplacer les granulats grossiers (Eo & Yi, 2014).....	8
Tableau 2.5. Résistance à la compression des bétons	20
Tableau 2.6. Résistance à la compression du béton en fonction du taux de remplacement de la poudre de palourde (Olivia et al., 2015)	20
Tableau 2.7. Formulations des mélanges de mortiers (Chin-Peow et al., 2015)	22
Tableau 2.8. Résistance à la traction des bétons	26
Tableau 2.9. Module d'élasticité du béton	28
Tableau 2.10. Résultats de l'essai de lixiviation (Ben Othman et al., 2014)	30
Tableau 2.11. Teneur en chlorure des sables et propriétés mécaniques du béton à l'état durci (MPa) (Tang & Cui, 2017)	31
Tableau 3.1. Formulations de pâtes de ciment avec poudre de palourde non tamisée	37
Tableau 3.2. Formulations de pâtes de ciment avec la poudre de palourde tamisée.....	38
Tableau 3.3. Formulations de mortiers à base de sable de dragage	43
Tableau 3.4. Formulations de mortiers en utilisant les coquilles de palourde concassées.....	44
Tableau 4.1. FRX de la poudre de palourde brute	48
Tableau 4.2. FRX de la poudre de palourde calcinée	49
Tableau 4.3. Analyse granulométrique de la poudre de palourde	50
Tableau 4.4. Analyse granulométrique des coquilles de palourde concassées.....	52
Tableau 4.5. Résistance à la compression des pâtes en fonction du taux du remplacement.....	53
Tableau 4.6. Résistance à la compression des pâtes en fonction de la taille des particules de la poudre de palourde brute.....	55
Tableau 4.7. Résistance à la compression des pâtes en fonction de la taille des particules de la poudre de palourde.....	56

Tableau 4.8. Résistance à la compression des pâtes en fonction du taux de remplacement de la poudre calcinée	59
Tableau 4.9. Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de remplacement de la poudre de palourde non calcinée.....	60
Tableau 4.10. Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de remplacement du sable naturel par les coquilles de palourde	61

LISTE DES SYMBOLES

C_2S	Silicate bicalcique
C_3A	Aluminate tricalcique
C_3S	Silicate tricalcique
C_4AF	Ferroaluminate tétracalcique
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium ou portlandite
CaO	Chaux
$CaCO_3$	Carbonate de calcium
SiO_2	Silice
H_2O	Eau
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
E/C	Eau sur ciment
E/L	Eau sur liant
C/S	Ciment sur sable
mm	Millimètre
μm	Micromètre
t	Tonne

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte et problématique

Le béton figure parmi les matériaux de construction les plus utilisés, à travers le monde. La production du ciment, un des ingrédients du béton, est très énergivore et génère des quantités énormes de gaz à effet de serre. En effet, l'analyse de cycle de vie a montré que lors de la production de 1 t de ciment, environ 0,8 t de CO₂ sont émises (Flower & Sanjayan, 2007). À cet effet, plusieurs chercheurs ont démontré la faisabilité d'incorporer des résidus divers dans le béton tels que la poudre de verre, les cendres volantes, les coquilles d'œufs, etc. afin de réduire la quantité de ciment. À titre d'exemple, dans les domaines d'aquaculture, d'énormes quantités de déchets de coquilles sont produites chaque année (FAO, 2016). Ces résidus marins sont généralement mis en décharge ou déversés directement dans les zones maritimes, créant ainsi une odeur désagréable due à leur décomposition et engendrant des conséquences néfastes sur l'environnement. Or, ces coquilles sont majoritairement composées de carbonate de calcium qui est la matière première pour la production du ciment et du béton. Par conséquent, le recyclage des résidus marins et leur incorporation dans le béton semble judicieux. Cela permet de réduire l'impact environnemental du ciment, de réduire la dépendance aux ressources naturelles, et d'assurer une bonne gestion des déchets. Des études approfondies doivent cependant être élaborées afin de caractériser ces matières résiduelles et d'évaluer leur comportement dans le béton. En effet, ces matériaux recyclés doivent répondre aux mêmes règles de qualité que les matériaux conventionnels. Par conséquent, il serait possible de les valoriser et d'aboutir alors à des matériaux cimentaires écologiques, performants et durables, s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire.

Face à la quantité énorme de béton produite chaque année, l'extraction des ressources granulaires naturelles ne cesse d'augmenter dans les quatre coins du monde. En effet, une estimation de la consommation mondiale en granulats dépasse les 40 milliards de tonnes par an, et entre 64% et 75% des granulats extraits sont utilisés pour le béton (UNEP, 2014). Par conséquent, cette dépendance excessive mènerait logiquement à un épuisement des ressources terrestres. Ce qui est le cas aux Îles de la Madeleine au Québec (IDM). En effet, le défi aux IDM semble être de taille, étant donné que ces îles se trouvent en déficit de ressources granulaires et la pénurie en ces ressources représente une véritable menace. Ainsi, il est indispensable de recourir à d'autres sources d'approvisionnement. Dans le cadre de l'approche de recyclage et de réutilisation, l'exploitation et la valorisation des matières résiduelles des IDM apparaît comme une alternative prometteuse adaptée aux particularités du milieu et respectant les principes du développement durable. De plus, ces résidus ne pourront plus être enfouis. En effet, l'instauration d'un lieu d'enfouissement technique est difficilement applicable dans les IDM. Cela est dû aux

facteurs tels que la perméabilité du sol, la superficie restreinte, l'approvisionnement en eau et le risque de contamination (Légaré Bilodeau et al., 2011).

Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux des IDM. En effet, ce travail s'intéresse à la formulation des matériaux cimentaires à base de coquilles de palourde et de sable de dragage provenant des IDM. Des réponses ciblées seront ainsi apportées quant à la faisabilité de l'inclusion de ces matériaux locaux et disponibles, en vue d'obtenir des bétons ou des mortiers écologiques, durables et économiques en minimisant les coûts onéreux liés au transport et à l'extraction des granulats.

1.2. Objectifs du projet de recherche

L'objectif global de ce travail de recherche consiste à fabriquer des matériaux cimentaires en remplaçant une partie du ciment par la poudre de palourde et le sable ordinaire par le sable de dragage et par du granulat fin provenant du concassage des coquilles. Ainsi, l'effet de l'incorporation de ces matières résiduelles sur la résistance à la compression des pâtes de ciment et des mortiers formulés sera évalué. Le but est de confectionner des mélanges simples et économiques, sans avoir recours à des adjuvants chimiques. En d'autres termes, notre vision consiste à voir si un petit entrepreneur pourrait utiliser ces matériaux locaux pour fabriquer des matériaux cimentaires adéquats. Ainsi, si les résultats sont satisfaisants, on pourrait songer à optimiser les mélanges et améliorer leurs performances à l'état frais et à l'état durci.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Caractériser la poudre de palourde brute et calcinée.
- Optimiser le taux de remplacement de cette poudre dans le ciment, dans les pâtes de ciment et les mortiers (en utilisant le sable de dragage des IDM au lieu du sable ordinaire, lors de la formulation des mortiers).
- Optimiser la taille des particules de cette poudre pour remplacer partiellement le ciment, en jouant le rôle d'un filler calcaire.
- Évaluer l'effet de la calcination de la poudre de palourde sur le développement des résistances à la compression des pâtes de ciment.
- Optimiser le taux de remplacement des granulats fins naturels par les coquilles de palourde concassées.
- Étudier l'effet de la synergie entre le remplacement d'une partie du ciment par la poudre de palourde et le remplacement du sable ordinaire par les coquilles concassées, sur le développement des résistances des mortiers.

1.3. Structure de mémoire

Ce mémoire de maîtrise se divise en six chapitres :

Chapitre 1 : Introduction. Dans ce chapitre, la problématique de l'étude est exposée. De plus, les objectifs de la recherche consistant à optimiser l'inclusion des coquilles de palourde et du sable de dragage des IDM dans les matériaux cimentaires, sont présentés.

Chapitre 2 : Revue de littérature. Le second chapitre constitue une revue bibliographique sur l'incorporation des coquilles et du sable de dragage dans les matériaux cimentaires, à travers le monde. Les résultats obtenus quant à l'effet de ces matériaux sur les propriétés mécaniques des matériaux formulés sont également présentés.

Chapitre 3 : Méthodologie. Ce chapitre concerne le programme expérimental réalisé afin d'atteindre les objectifs visés, notamment les différentes propriétés des coquilles de palourde des IDM et les différentes formulations des pâtes et des mortiers réalisées à base de ces coquilles et de sable de dragage.

Chapitre 4 : Présentation et analyse des résultats. Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus dans cette étude, à partir des différentes formulations et essais réalisés. En outre, une analyse de ces résultats est présentée, permettant de comprendre l'influence des paramètres étudiés sur le développement des résistances à la compression uniaxiale des matériaux alternatifs proposés.

Chapitre 5 : Discussion des résultats.

Chapitre 6 : Ce chapitre résume l'ensemble des résultats obtenus et propose des axes de recherche à développer.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Introduction

Dans le cadre de ce travail, on vise la valorisation des résidus marins des îles de la Madeleine, dans la formulation des matériaux cimentaires. Ainsi, il serait possible de leur donner une seconde vie pour remplacer partiellement le ciment et développer des granulats grossiers écologiques. Dans cette partie, les travaux de recherche, ayant utilisé des résidus afin de formuler des matériaux cimentaires écologiques, seront analysés. Le Tableau 2.1 illustre quelques travaux de recherche qui ont été publiés, à travers le monde, en vue d'étudier la faisabilité de l'incorporation de différents types de coquilles de mollusques dans le béton et les mortiers.

Tableau 2.1. Travaux de recherche sur l'incorporation des coquilles de mollusques

Pays	Type de coquilles	Utilisation	Références
Pérou	Coquilles péruviennes	Remplacement des granulats fins	(Varhen et al., 2017)
Espagne	Moules	Remplacement des granulats (grossiers et fins)	(Martínez-García et al., 2017)
France	Pétoncle	Remplacement des granulats grossiers	(Nguyen et al., 2013)
Malaisie	Coque	Remplacement du ciment	(Othman et al., 2013)
Indonésie	Coque/Palourde	Remplacement du ciment	(Olivia et al., 2015), (Olivia et al., 2017)
Nigeria	Bigorneau	Remplacement du ciment	(Otunyo et al., 2013)
Inde	Escargot	Remplacement du ciment	(Zaid & Ghorpade, 2014)
Ghana	Escargot	Remplacement du ciment	(Nkrumah & Dankwah, 2016)
France	Crépidule/Coquilles Saint-Jacques	Remplacement des granulats grossiers	(Nguyen et al., 2017)
Thaïlande	Palourde/Moule verte/Coque/Huître	Remplacement du ciment	(Lertwattanakul et al., 2012)
Chine	Huître	Remplacement du ciment	(Zhong et al., 2012)

2.2. Valorisation des coquilles de mollusques dans le béton

2.2.1. Caractérisations des coquilles

2.2.1.1. Composition chimique des coquilles

Les coquilles de mollusques sont majoritairement composées (plus de 90%) de carbonate de calcium (CaCO_3). Les formes polymorphiques de CaCO_3 dans les coquilles ont été déterminées comme étant respectivement, la calcite et l'aragonite. Cette composition est similaire à la poudre de calcaire utilisée pour produire le ciment Portland (Lertwattanakul et al., 2012; Olivia et al., 2015; Yang et al., 2005). Ce qui permet leur utilisation comme un filler calcaire dans le ciment.

Dans ce contexte, le Tableau 2.2 illustre la composition chimique du ciment et de quelques coquilles. Ainsi, la plus forte teneur en CaO a été obtenue dans les coquilles de palourde. En outre, il a été montré qu'il existe de légères différences entre les compositions chimiques des coquilles brutes et brûlées (Tayeh et al., 2019). En d'autres termes, les coquilles brutes sont très riches en carbonate de calcium (CaCO_3) alors que les coquilles brûlées sont riches en CaO . Ceci est expliqué par le fait que le chauffage du carbonate de calcium à des températures supérieures à 550°C (Lertwattanakul et al., 2012; Mohammad et al., 2017), génère la formation, par calcination, de la chaux vive et du CO_2 , comme le montre la réaction (1):



Tableau 2.2. Composition chimique du ciment Portland et des coquilles
(Mohammad et al., 2017)

Oxydes (%)	Ciment Portland	Palourde	Moule	Huître	Escargot	Coque
CaCO_3	-	96,8	95,6	96,8	-	-
CaO	65,5	67,7	53,4	53,6	61,9	51,6
SiO_2	20,9	0,8	0,7	1	10,2	1,6
Al_2O_3	5,5	0,1	0,1	0,1	4,8	0,9
Fe_2O_3	3,8	0,1	0,1	0,1	3,2	-

2.2.1.2. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des résidus marins affectent le comportement du béton. Dans ce contexte, le Tableau 2.3 présente les résultats sur la taille, la densité relative et la surface spécifique de différents types de poudre de coquilles utilisés pour le remplacement partiel du ciment. En effet, les densités relatives qui ont été obtenues sont inférieures à celles du ciment Portland. De plus, la taille des particules dépend certes du processus et de la durée du broyage des coquilles. Ainsi, plus la finesse des particules est élevée, plus la surface totale est grande, plus l'accroissement de la résistance est rapide. Par conséquent, il est important de transformer les coquilles en poudre de plus grande surface spécifique.

Dans ce contexte, Lertwattanakul et al. (2012) ont rapporté que la surface spécifique de la poudre de palourde était de 8279 cm²/g, celle d’huître était de 14280 cm²/g et celle de coque était de 8299 cm²/g. Par ailleurs, la surface du ciment Portland était de 3376 cm²/g. Les chercheurs ont montré que la poudre d’huître était la plus fine permettant un meilleur développement de la résistance grâce à l’amélioration de la réaction pouzzolanique.

Tableau 2.3. Propriétés physiques du ciment Portland et des coquilles

Type de coquilles	Taille (µm)	Densité relative	Surface de Blaine (cm ² /g)
Coque	< 75 µm (Olivia et al., 2015)	2,82 (Lertwattanakul et al., 2012)	8299 (Lertwattanakul et al., 2012)
Palourde	< 75 µm (Olivia et al., 2017)	2,71 (Lertwattanakul et al., 2012)	8279 (Lertwattanakul et al., 2012)
Huître (Lertwattanakul et al., 2012)	< 75 µm	2,65	14280
Escargot (Zaid & Ghorpade, 2014)	< 90 µm	2,44	-
Ciment Portland (Lertwattanakul et al., 2012)	-	3,11	3376

Yoon et al. (2003) ont étudié les caractéristiques des coquilles d’huîtres disposées sur la côte sud de la Corée du Sud. Les résultats de cette étude ont montré que la densité relative de la coquille d’huître broyée dépendait du degré de broyage. Ainsi, plus la taille des particules est petite, c’est-à-dire plus le degré de broyage augmente, plus la valeur de la densité relative se rapproche de celle du carbonate de calcium (2,71), qui constitue le composant principal de ces coquilles.

En outre, Adewuyi & Adegoke et al. (2008) ont remplacé les granulats grossiers dans le béton par les coquilles de bigorneau qui sont des petits escargots marins fréquents dans les zones côtières du Nigeria. Le rapport entre la longueur maximale et le diamètre des coquilles utilisées était égal à 3,23. De plus, la courbe granulométrique a montré que le coefficient d’uniformité était supérieur à 4 et que le coefficient de courbure était de 1,75, ce qui implique que ces coquilles étaient adaptées à la fabrication du béton. Une autre étude a été menée par Nguyen et al. (2017) en vue de valoriser les coquilles de crépidules, de pétoncles et Saint-Jacques provenant de la côte ouest française dans le béton drainant. En effet, ce béton a été développé afin de réduire la quantité d’eau de ruissellement, de ralentir son écoulement et d’augmenter son infiltration dans le sol. Les coquilles ont été concassées pour obtenir la fraction 2/4 mm (Figure 2.1) et utilisées pour remplacer 60% des granulats naturels. Les masses spécifiques étaient respectivement de 2696 kg/m³, 2523 kg/m³ et 2497 kg/m³.



Figure 2.1. Coquilles concassées (Nguyen et al., 2017)

Eo & Yi (2014) ont également utilisé les coquilles d'huître issus de la Corée du Sud pour remplacer les granulats grossiers dans le béton. La Figure 2.2 illustre les coquilles concassées ayant pour diamètres entre 10 et 25 mm.



Figure 2.2. Coquilles d'huître concassées utilisées comme granulats grossiers (Eo & Yi, 2014)

Les propriétés physiques des coquilles d'huître utilisées pour la substitution des granulats grossiers sont résumées dans le Tableau 2.4. La densité relative des coquilles était de 1,85. On rappelle que le module de finesse (MF) indique la finesse d'un granulat. Il augmente avec la quantité des particules grosses contenue dans ce granulat. Ce module est défini dans la norme ASTM C125 comme un facteur obtenu en additionnant le pourcentage des retenus cumulés sur chaque tamis d'une série spécifique d'un échantillon de granulats, divisé par 100.

Tableau 2.4. Propriétés physiques des huîtres pour remplacer les granulats grossiers (Eo & Yi, 2014)

Diamètre	Densité relative	Module de finesse	Absorption (%)
5-10 mm	1,85	4,8	9,2
10-13 mm		5,9	
19-25 mm		6,5	

2.2.2. Microstructures

Le ciment possède la propriété d'un liant hydraulique, ce qui signifie qu'il suffit de lui ajouter de l'eau pour durcir et acquérir les propriétés de cohésion et de résistance. C'est un composé multiphasique complexe, formé de 4 phases principales notées : C_2S , C_3S , C_3A et C_4AF . Lorsque les grains de ciment sont mis en présence d'eau, les composants solubles passent rapidement en solution. Ce sont les ions calcium, sodium, potassium, les hydroxydes et les sulfates qu'on retrouve dans la phase liquide. Le processus d'hydratation regroupe l'ensemble des réactions chimiques qui conduisent ainsi à la formation des produits d'hydratation qui sont à l'origine des propriétés mécaniques de la pâte. Au fur et à mesure de l'hydratation, la porosité capillaire diminue et les caractéristiques mécaniques de la pâte s'améliorent comme notamment la résistance à la compression.

La cinétique d'hydratation des aluminates de calcium C_3A est très rapide. Voilà pourquoi du gypse (sulfate de calcium hydraté) est broyé avec le clinker. Sa présence lors de l'hydratation du ciment joue le rôle de régulateur de prise. En effet, lorsque le C_3A se retrouve en présence de l'eau et du gypse, il s'hydrate très rapidement et se transforme en ettringite (Aitcin, 2003; Tagnit Hamou, 1995). Quand le sulfate de calcium s'épuise, le C_3A anhydre décompose l'ettringite pour former un autre sulfoaluminate de calcium moins riche en sulfate et plus stable qui est le monosulfoaluminate ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$).

A travers la microscopie électronique à balayage (MEB), la microstructure des produits d'hydratation suivants peut être observée (Aitcin, 2003; Tagnit Hamou, 1995):

- Silicate de calcium hydraté (C-S-H) : C'est le principal produit d'hydratation du ciment portland qui développe la résistance de la pâte de ciment. Il est généralement amorphe ou très peu cristallin, souvent appelé gel. Sa morphologie varie en fonction du rapport calcium/silice (Ca/Si), du rapport (E/C), des conditions de mûrissement, du degré d'hydratation du ciment et des adjuvants chimiques. Il se présente sous forme de fibres très fines (Figure 2.3).

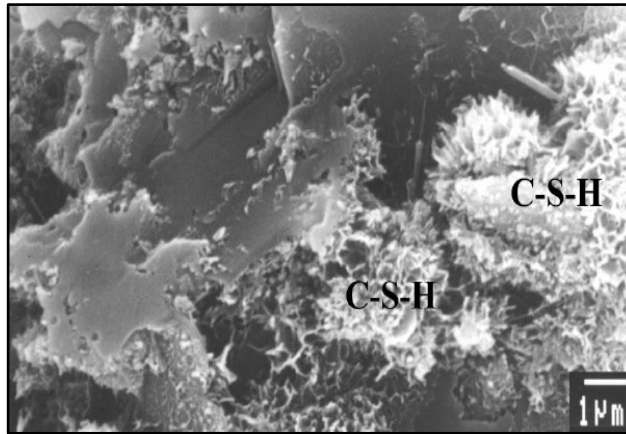


Figure 2.3. C-S-H externe cristallisé par précipitation (Tagnit-Hamou, 2013)

- Portlandite ou hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH) : phase majeure de l'hydratation du ciment, participant aux résistances à très jeune âge et se présente sous différentes tailles et formes, y compris des cristaux hexagonaux plats et des feuillets. Elle est normalement observée dans toute la pâte de ciment et se développe parfois le long des interfaces pâte-granulat. La portlandite peut aussi se trouver à l'état amorphe lorsqu'elle ne trouve pas assez d'espace pour cristalliser (Figure 2.4).

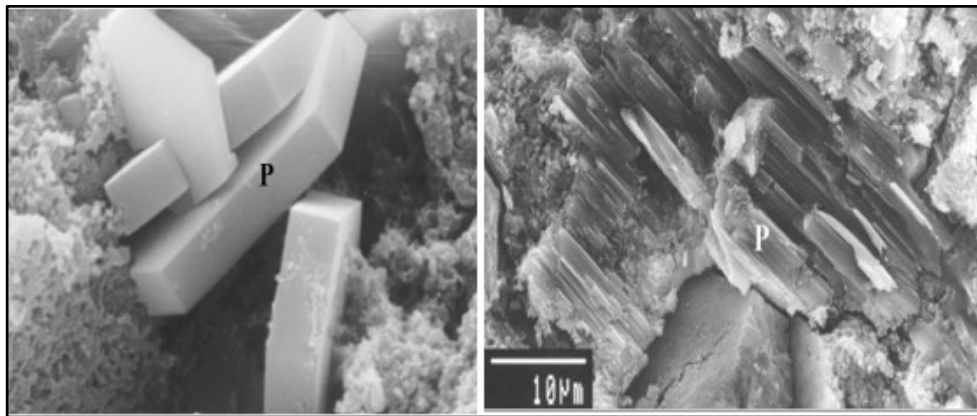


Figure 2.4. Cristaux de portlandite (Tagnit-Hamou, 2013)

- Ettringite : est un produit primaire des réactions entre les aluminates de calcium et les phases sulfate du ciment. Elle cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale autour des grains de ciment anhydres. Elle apparaît aussi comme un dépôt secondaire se trouvant généralement dans les vides et les fissures (Figure 2.5).

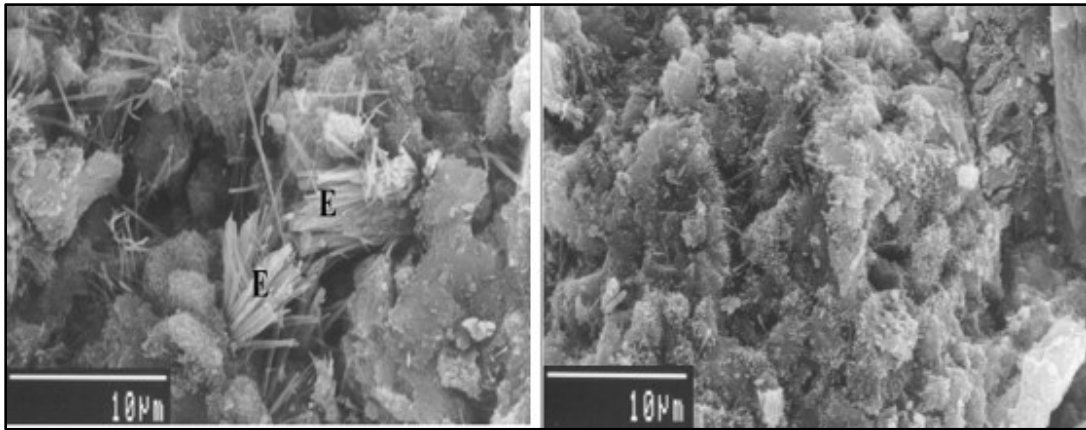


Figure 2.5. Cristaux d'ettringite dans une pâte de ciment hydraté à l'âge de 3 jours (Tagnit-Hamou, 2013)

- Le monosulfoaluminate de calcium hydraté cristallise en plaquettes hexagonales. Ces cristaux se retrouvent parsemés dans les fibres de C-S-H (Figure 2.6).

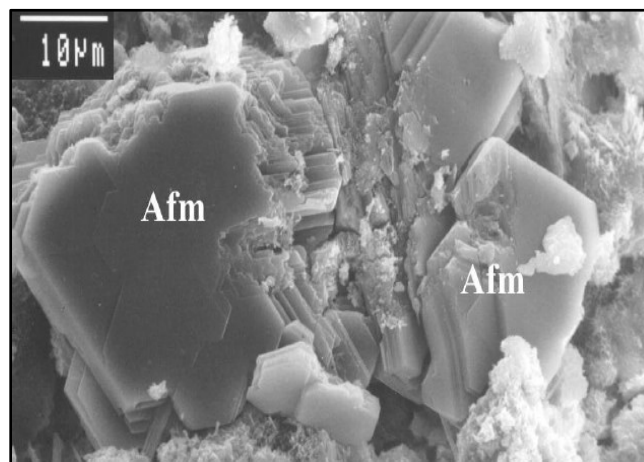


Figure 2.6. Cristaux monosulfoaluminate (Tagnit-Hamou, 2013)

Des travaux de recherche ont montré que la poudre de coquilles majoritairement composée de carbonate de calcium et les fillers calcaires de façon générale peuvent être utilisés de deux manières (Husson, 1991; Larrard, 1999):

- Soit mélangés par les cimentiers en broyant ensemble le clinker, le gypse et le filler. Ce qui réduit le coût du ciment.
- Soit dans la fabrication des bétons, où on distingue deux cas :
 - Dans les bétons à caractéristiques normales, où seule est recherchée la résistance à 28 jours, les fillers remplacent une partie du ciment. Ce qui est le cas de notre projet.

- Dans les bétons spéciaux (bétons hautes performances, bétons fluides et pompables...), ils sont utilisés pour augmenter les résistances mécaniques ou les propriétés rhéologiques, sans changer le dosage en ciment. En effet, ils diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent sa résistance et sa durabilité (Tagnit Hamou, 1995).

Des études ont montré que l'addition du carbonate de calcium (CaCO_3) au clinker permet de modifier la réaction d'hydratation. En effet, la formation du monosulfoaluminate est retardée ou stoppée quand une grande quantité de carbonate est présente dans la pâte hydratée. Ainsi, le carbonate de calcium n'est pas considéré comme inerte vis-à-vis des aluminates calciques, sachant que le filler est inerte lorsqu'il n'a aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau et il est actif s'il a, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau. Donc, le carbonate de calcium participe aux réactions d'hydratation pour former des carboaluminates de calcium hydratés ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) à la surface des grains de C_3A , qui cristallisent en fines plaquettes hexagonales. Ces carboaluminates contribueraient à la résistance mécanique comme les autres hydrates. La quantité des carboaluminates dépend des teneurs en C_3A , CaCO_3 et de la finesse (Husson, 1991; Ingram & Daugherty, 1991; Ipavec et al., 2011; Tayeh et al., 2019; Wang et al., 2019).

Les ajouts de calcaires jouent le rôle de site de nucléation au cours de la réaction d'hydratation du ciment. Ce qui engendre une meilleure répartition des hydrates, notamment de la portlandite, dans la pâte de ciment durcie. De surcroît, la présence de CaCO_3 peut aussi avoir une influence sur l'hydratation de C_3S . Des chercheurs ont montré que cette réaction s'accélère quand la quantité et la finesse de CaCO_3 sont élevées. Ils ont trouvé que le gel C-S-H incorpore une quantité importante de CaCO_3 dans sa structure. Par conséquent, la présence de carbonate accélère l'hydratation du ciment Portland et cet effet d'accélération devient négligeable après 28 jours (Husson, 1991).

Wang et al. (2019) ont investigué l'effet de l'incorporation de la poudre de coquilles sur l'hydratation du ciment. Les chercheurs ont fait varier le taux de remplacement de la poudre dans le ciment. Les résultats de la DRX ont montré que dans tous les mélanges contenant la poudre de coquilles, il y a eu une présence de carboaluminate de calcium. Ce dernier possède généralement une morphologie similaire à celle de l'ettringite mais contenant le carbone depuis le premier jour de l'hydratation (Figure 2.7).

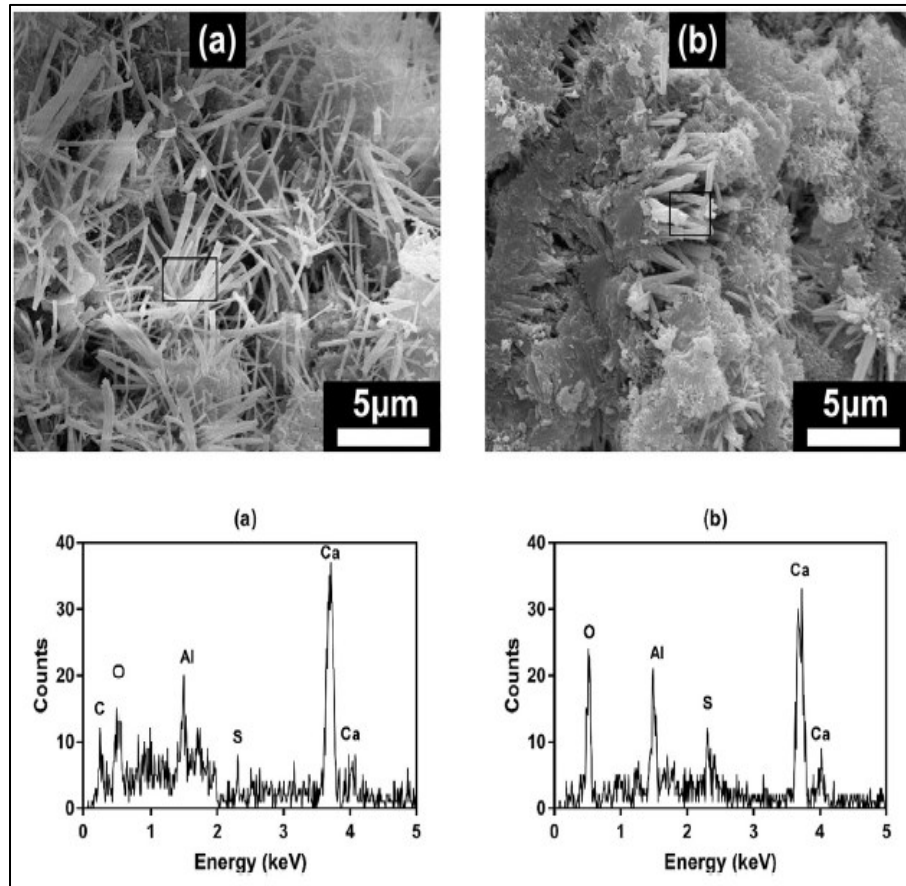


Figure 2.7. Images au MEB: (a) le carboaluminate de calcium et l'ettringite développés dans des mélanges de ciment hydraté avec de la poudre de coquilles, et (b) l'ettringite développée dans un mélange 100% ciment (Wang et al., 2019)

Zhong et al. (2012) ont incorporé la poudre de coquilles d'huître dans le ciment pour formuler des mortiers. Les coquilles étaient collectées, nettoyées et séchées. Elles étaient placées dans un broyeur à boulets ensuite séchées à 105 °C pendant 24 h et passaient au tamis 100 (165 μm). Les auteurs ont étudié la microstructure des matériaux cimentaires obtenus. Ils ont constaté que sur les photos au MEB, une grande quantité de produits d'hydratation du ciment s'intercale sous forme d'aiguilles, qui est une morphologie typique de l'ettringite. En outre, la poudre d'huître a pu être clairement identifiée sous différentes formes (principalement des formes plates) (Figure 2.8). On peut remarquer que la poudre de coquilles et les matériaux cimentaires existaient indépendamment, et qu'il n'y a pas eu une réaction chimique entre eux. Par conséquent, cette poudre jouait essentiellement le rôle de matériau de remplissage n'ayant pas de propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques. On rappelle que la norme ASTM C125-07 définit les pouzzolanes comme des matériaux siliceux qui ne possèdent pas des propriétés liantes mais qui réagissent chimiquement avec la chaux, à température ordinaire, pour former des matériaux ayant des propriétés liantes.

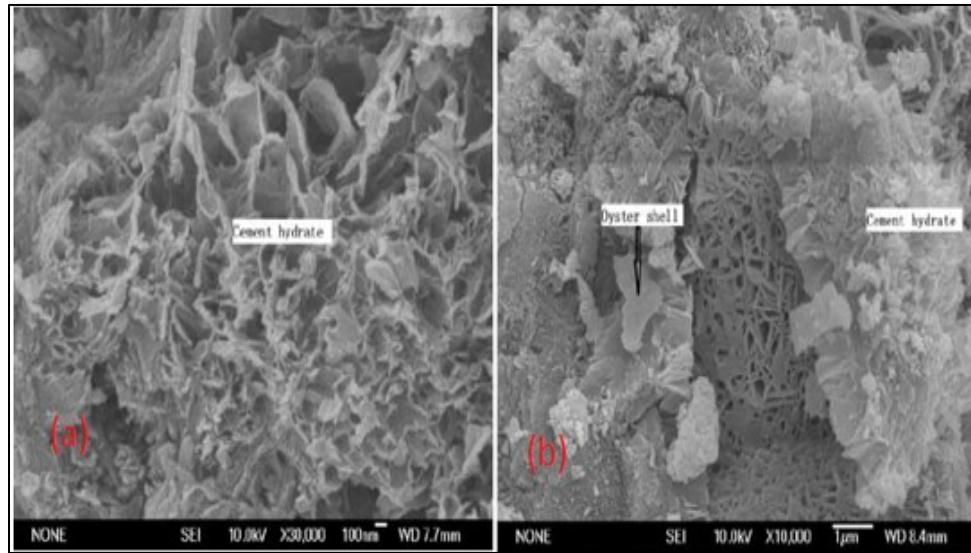


Figure 2.8. Photos MEB montrant que la poudre d'huître servait comme un filler calcaire:
a) 0 % poudre d'huître b) 10% poudre d'huître (Zhong et al., 2012)

2.2.3. Propriétés du béton des coquilles à l'état frais

2.2.3.1. Temps de prise

L'essai de prise du ciment est effectué afin de déterminer les temps de début et de fin de prise. Ces mesures permettent de déduire l'effet de l'addition des coquilles sur le temps de prise et de déterminer le développement des résistances à jeune âge. On tient à préciser que l'essai de prise doit être effectué dans des conditions de température constante étant donné que les températures élevées raccourcissent le temps de prise.

Lertwattanakul et al. (2012) ont réalisé l'essai de prise sur des mortiers contenant la poudre de coquilles calcinée, selon la norme ASTM C807. Ils ont rapporté que l'augmentation du taux de remplacement de la poudre de coquilles (5%, 10%, 15% et 20%) dans le ciment, pour confectionner des mortiers, a induit une augmentation du temps de début et de fin de prise, par rapport aux mortiers de référence. Cela a été attribué à la diminution de la quantité du ciment qui perturbe la réaction d'hydratation. Une autre recherche réalisée par Othman et al. (2013) a montré que l'ajout de la poudre de coquilles de coque calcinée a diminué le temps de prise du ciment.

En revanche, selon l'étude publiée par Olivia et al. (2017), les temps de fin de prise des bétons contenant 4% de poudres de coquilles de coque et de palourde calcinées dans le ciment, étaient plus courts que les temps de fin de prise du béton ordinaire. L'essai a été réalisé sur des cylindres 100x200mm, selon la norme nationale d'Indonésie SNI 15-2049-2004. Les chercheurs ont conclu que l'incorporation de ces poudres dans le béton a permis d'augmenter la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment à cause de la teneur élevée en chaux vive. La Figure 2.9 illustre les résultats obtenus.

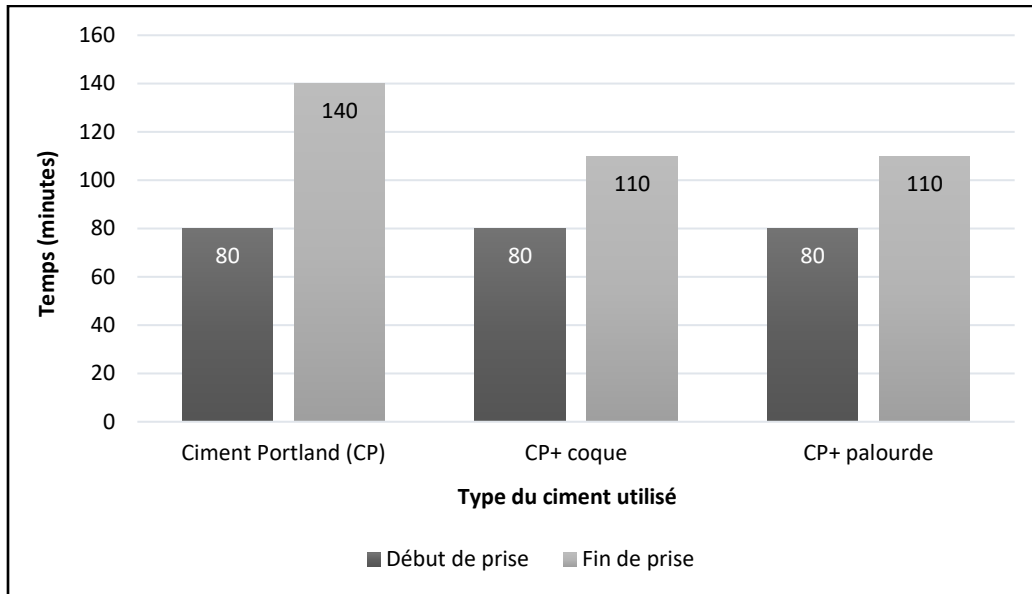


Figure 2.9. Temps de prise du béton ordinaire et du béton contenant 4% de poudre de coquilles dans le ciment (Olivia et al., 2017)

Yang et al. (2005) ont utilisé les coquilles d'huître provenant de la Corée du Sud pour remplacer les granulats fins dans le béton. Le béton a été formulé en faisant varier le taux de remplacement de 5%, 10% et 20%. Ainsi, le temps de prise a montré une valeur presque constante, quel que soit le taux de remplacement des coquilles d'huître. Cependant, ce temps a diminué d'environ 1 heure, lorsque 0,3% d'adjuvant entraîneur d'air de type naphthalène a été ajouté pour compenser la réduction de la maniabilité du béton liée à l'incorporation des coquilles. Ceci est certes dû à l'effet de l'adjuvant, qui retarde la réaction entre le ciment et l'eau de gâchage. Les chercheurs ont conclu que le temps de prise n'est pas affecté par la substitution des granulats fins par les coquilles d'huître jusqu'à un maximum de 20%.

2.2.3.2. Masse volumique

Olivia et al. (2017) ont comparé les masses volumiques des bétons contenant 4% de poudre de coquilles calcinée, dans le ciment avec le béton ordinaire. La Figure 2.10 illustre les résultats qui ont été obtenus. En premier lieu, la masse volumique du béton augmente avec l'âge de celui-ci. De plus, celle du béton contenant la poudre de palourde était la plus élevée. Cela pourrait être dû à la teneur élevée en CaO et à l'effet du remplissage que la poudre de palourde calcinée a joué permettant de réduire la porosité.

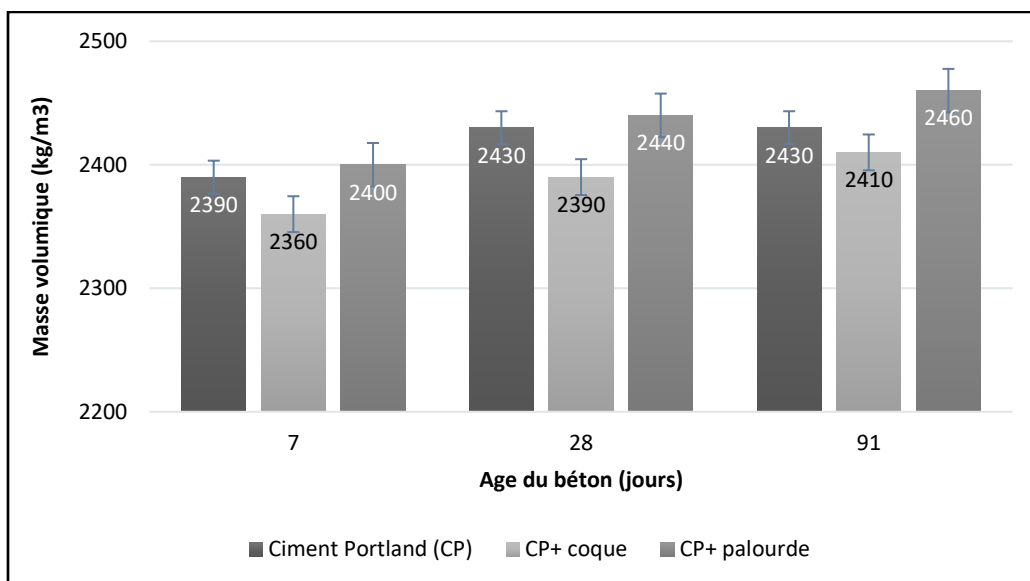


Figure 2.10. Masse volumique totale du béton ordinaire et du béton aux coquilles (Olivia et al., 2017)

D'autres études ont rapporté que la masse volumique diminuait légèrement quand le taux de remplacement des granulats par les coquilles concassées augmente. En effet, Adewuyi & Adegoke et al. (2008) ont noté que la masse volumique à 28 jours d'un béton, contenant 50% de coquilles concassées comme granulats grossiers, était supérieure à 2100 kg/m^3 . De plus, Khankhaje et al. (2017) ont fait varier le taux de remplacement des granulats grossiers par les coquilles de coque. Ainsi, ils ont constaté que la masse volumique était presque similaire à celle du mélange de référence, étant donné que la densité relative des coquilles de coque était similaire à celle des granulats naturels ($2,7 \text{ kg/m}^3$). Cependant, en augmentant le taux de substitution à 75%, la masse volumique du béton a légèrement diminué, en raison de la forme angulaire des coquilles, qui a fait augmenter la teneur en vides. En outre, Martínez-García et al. (2017) ont indiqué que la masse volumique du béton durci dépasse 2000 kg/m^3 lorsque le sable ordinaire est remplacé par la poudre des moules, pour un taux de remplacement allant jusqu'à 100 %. Par ailleurs, une réduction de 10% de la masse volumique du béton contenant 50% de coquilles comme granulats fins, a été observée.

2.2.3.3. Consistance

Généralement, la maniabilité du béton frais diminue quand le taux de remplacement des granulats par les coquilles augmente. En effet, la réduction de l'ouvrabilité pourrait être due à l'augmentation de la surface spécifique, à la forme irrégulière des coquilles, à la taille des coquilles et à l'absorption d'eau plus élevées des coquilles par rapport aux granulats naturels. Afin d'évaluer l'effet du remplacement des granulats par les coquilles sur la consistance du béton, Eo & Yi (2014) ont incorporé les coquilles d'huître dans les granulats pour fabriquer des bétons et ont, par la suite, mesuré l'affaissement. Ainsi, la Figure 2.11 illustre une représentation schématique des variations de l'affaissement du béton en fonction de la variation du taux de remplacement des granulats grossiers par les coquilles d'huître concassées. On constate que

quand le taux de remplacement des granulats grossiers était égal à 0,5 ; l'affaissement diminuait de 89% par rapport à celui du béton ordinaire, pour un rapport E/C égal à 0,6.

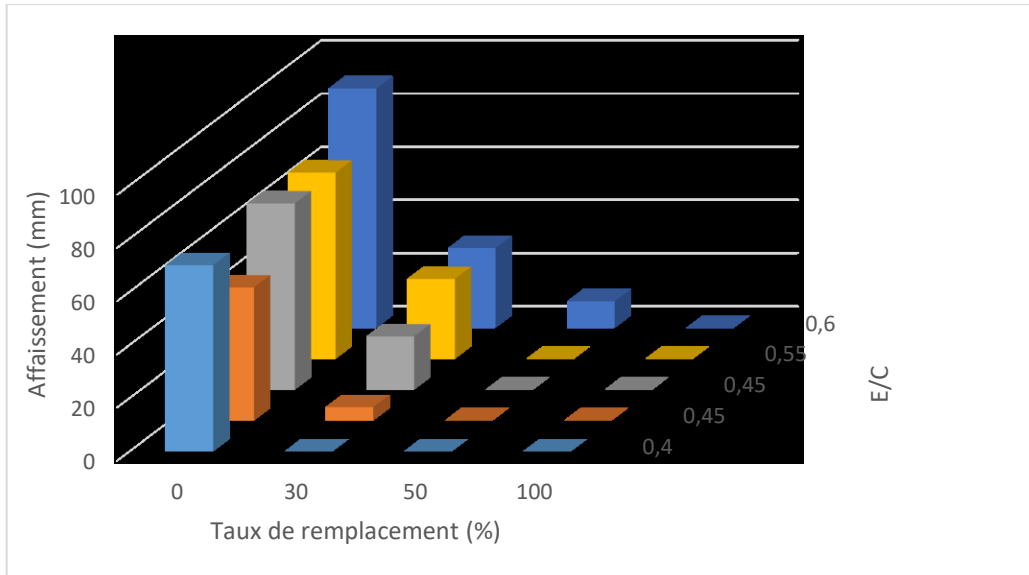


Figure 2.11. Variation de l'affaissement avec le taux de remplacement des granulats grossiers (Eo & Yi, 2014)

Dans le cas de substitutions des granulats fins par les coquilles d'huître, on constate d'après la Figure 2.12, que :

- Pour $E/C = 0,4$, l'affaissement augmente respectivement de 28% et 86% pour des taux de remplacement de 30% et 50%.
- Pour $E/C = 0,5$, l'affaissement augmente respectivement de 38% et 63% pour des taux de remplacement de 30% et 50%.
- Pour $E/C = 0,55$ et $0,6$, l'affaissement augmente de 63% pour un taux de remplacement de 30%.

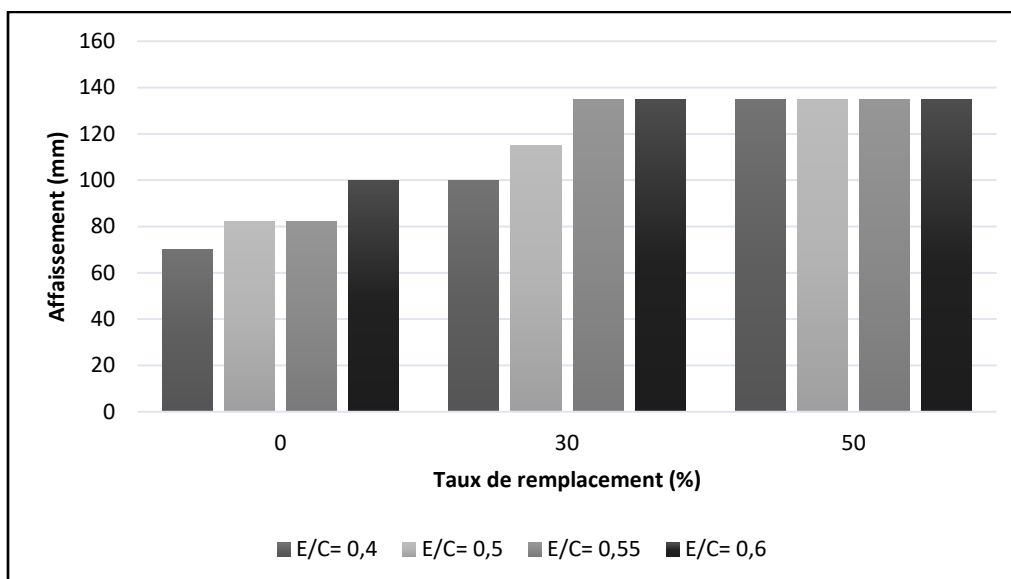


Figure 2.12. Variation de l'affaissement avec le taux de remplacement des granulats fins (Eo & Yi, 2014)

2.2.4. Propriétés du béton aux coquilles à l'état durci

2.2.4.1. Résistance à la compression uniaxiale

Lertwattanakruek et al. (2012) ont incorporé 3 types de poudre de coquilles (palourde, coque et huître), dans le ciment pour formuler des mortiers, en faisant varier le taux de remplacement (5%, 10%, 15% et 20%). La résistance à la compression uniaxiale a été déterminée à plusieurs échéances (1, 3, 7, 28 et 60 jours). Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de la poudre de coquilles a induit une diminution de la résistance des mortiers par rapport aux mortiers témoins et que les mélanges contenant la poudre de coquilles de palourde présentaient les meilleures performances. La Figure 2.13 montre les résultats correspondant à la résistance des mortiers contenant la poudre de palourde comme remplacement partiel du ciment.

On constate qu'il y a eu une diminution de la résistance à 7 jours de 5% et 14%, respectivement pour des taux de remplacement de 5 et 10%. De plus, la diminution des résistances à 28 jours était respectivement de 17% et 23%. Cette réduction pourrait être expliquée par l'absence de la réactivité chimique entre les poudres de coquilles et le ciment Portland. Mais, les petites particules de coquilles broyées inférieures à celles des particules du ciment peuvent agir comme un matériau de remplissage, s'insérant dans les vides. Les résistances à la compression des mortiers contenant des coquilles étaient plus faibles que celles du mortier de référence.

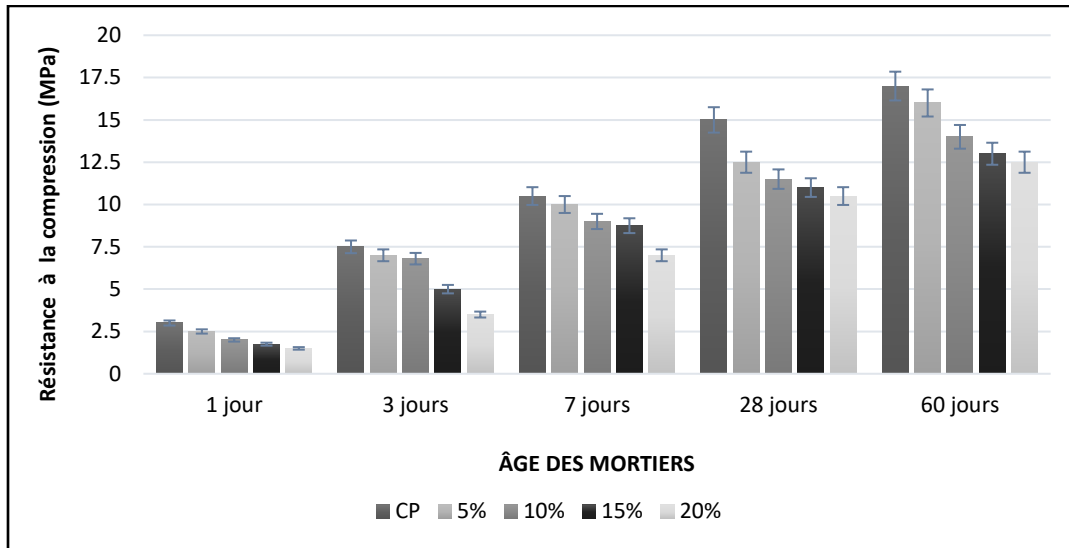


Figure 2.13. Résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de palourde (Lertwattanakul et al., 2012)

Sandjaya et al. (2019) ont également recyclé les coquilles de palourde (*Anadara Granosa*) provenant de la côte ouest de la Malaisie péninsulaire. Ces coquilles ont été nettoyées, séchées et broyées jusqu'à obtenir une poudre (Figure 2.14). Cette poudre n'a pas été calcinée afin de minimiser l'émission de CO₂. Elle a été utilisée pour remplacer partiellement le ciment dans des mortiers, avec des taux de remplacement de 5%, 10%, 15% et 20%.



Figure 2.14. Coquilles de palourde broyées (*Anadara Granosa*) (Sandjaya et al., 2019)

Les chercheurs ont considéré un rapport E/C = 0,48 et un rapport C/S = 0,36 pour formuler des mortiers. Deux types de mélanges ont été formulés. Dans le premier mélange, la quantité d'eau a été maintenue constante même si le ciment est remplacé par la poudre. En ce qui concerne le second mélange, la quantité d'eau variait en fonction de la quantité du ciment afin de maintenir le rapport E/C constant. L'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur des moules cubiques de 5 cm, à 7 et 28 jours. Les résultats obtenus pour le premier mélange sont représentés dans la Figure 2.15. Il peut être observé que l'incorporation de la poudre a engendré une diminution de

la résistance. Ainsi, celle-ci a diminué respectivement de 34%, 41%, 46%, et 53%, à 7 jours par rapport aux mortiers témoins. De plus, la réduction de la résistance à 28 jours était respectivement de 23%, 29%, 33% et 35%.

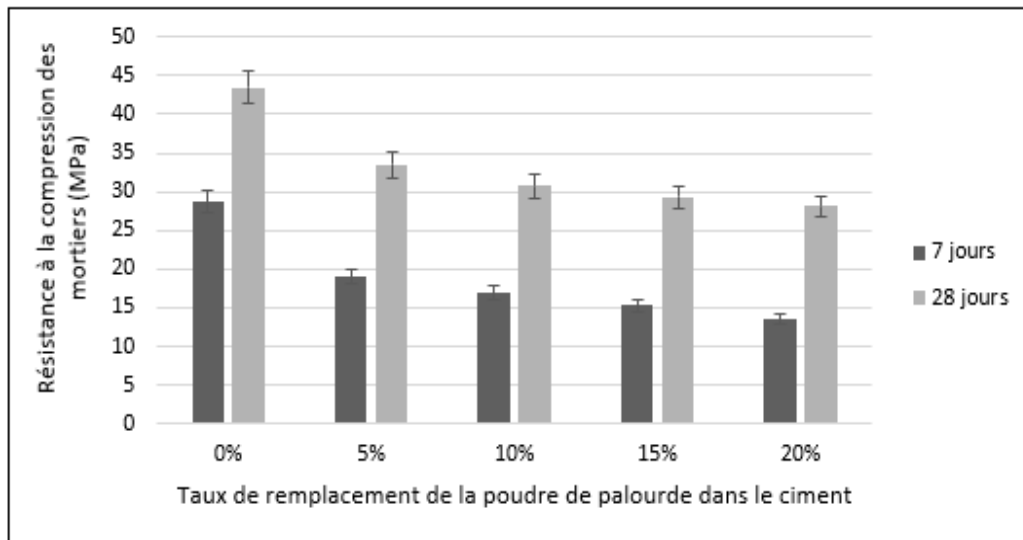


Figure 2.15. Résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de palourde (*Anadara Granosa*) pour le mélange 1 (Sandjaya et al., 2019)

Les résultats obtenus pour le deuxième mélange sont représentés dans la Figure 2.16. On constate que l'ajout de la poudre de palourde au ciment a engendré une diminution de la résistance, respectivement de 3%, 5%, 7%, et 11%, à 7 jours par rapport aux mortiers témoins. De plus, la réduction de la résistance à 28 jours était respectivement de 14%, 18%, 21% et 24%.

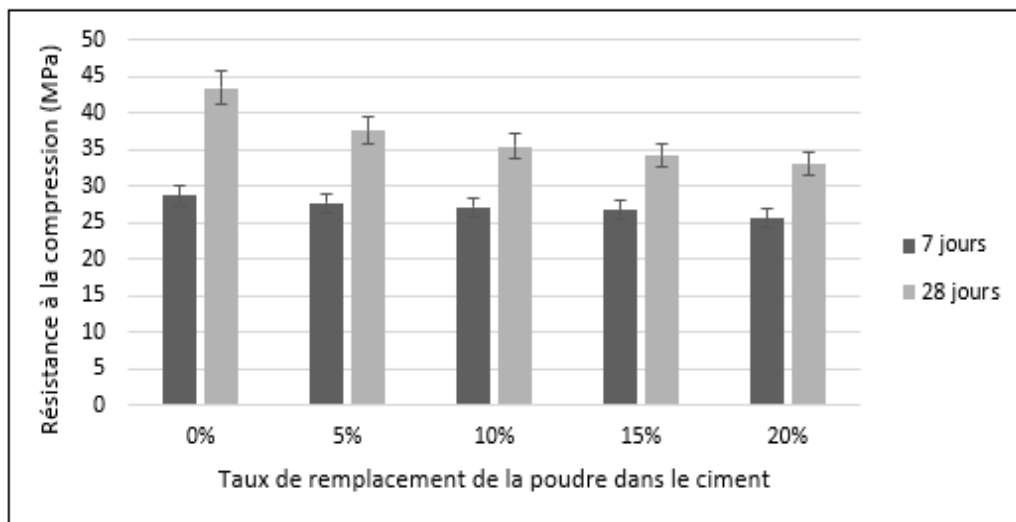


Figure 2.16. Résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de palourde (*Anadara Granosa*) pour le mélange 2 (Sandjaya et al., 2019)

Le Tableau 2.5 résume les résultats de diverses études où une partie du ciment a été remplacée par de la poudre de coquilles. Une étude a été réalisée par P. Adewuyi et al. (2015) qui ont valorisé les coquilles de bigorneau et d'escargot provenant du Nigeria, en les incorporant dans le ciment pour fabriquer le béton. La résistance à la compression uniaxiale était déterminée à 28 jours. Les chercheurs ont noté une augmentation de la résistance de 8,5% et 3% des bétons contenant les coquilles par rapport au béton de référence. De même, Olivia et al. (2017) ont déterminé la résistance du béton contenant la poudre de palourde. Les résultats ont montré que la résistance à 28 jours augmentait de 7,5% par rapport au béton ordinaire. En revanche, les résultats obtenus par Olivia et al. (2015) ont montré que la résistance du béton contenant la poudre des coquilles de coque a diminué de 12,5% à 28 jours par rapport à celle du béton témoin. En se basant sur ces études, on peut supposer que l'ajout de la poudre de palourde a permis d'atteindre des résistances à la compression supérieures à celles des échantillons témoins. D'ailleurs, selon Olivia et al. (2017), la coquille de palourde est le matériau le plus approprié pour remplacer le ciment dans le béton, pour un pourcentage optimal de remplacement égal à 4%.

Tableau 2.5. Résistance à la compression des bétons

Types de coquilles	Taux de remplacement optimal (%)	Résistance des échantillons témoins (MPa)		Résistance à la compression uniaxiale (MPa)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
Bigorneau ^a	10	-	17,5	-	19
Escargot ^a	20	-	17,5	-	18
Coque ^b	5	32	36,5	31,5	36
Palourde ^c	4	33,8	37	34	39,8

Source: ^a (P. Adewuyi et al., 2015); ^b(Olivia et al., 2015); ^c (Olivia et al., 2017);

Dans le cadre de l'étude réalisée par Olivia et al. (2015), afin d'optimiser le taux de remplacement de la poudre de palourde dans le ciment, les auteurs ont fait varier ce taux de 2%, 4%, 6% et 8%. Puis, pour chaque pourcentage de remplacement, la résistance à la compression du béton a été déterminée. Ainsi, la résistance maximale qui a été obtenue (32 MPa à 28 jours), correspondait à un taux de remplacement de 4%. Par conséquent, le taux optimal de remplacement de la poudre de palourde permettant d'avoir un comportement mécanique du béton proche de celui du témoin, était considéré égal à 4% (Tableau 2.6).

Tableau 2.6. Résistance à la compression du béton en fonction du taux de remplacement de la poudre de palourde (Olivia et al., 2015)

Taux de remplacement des coquilles dans le ciment	Résistance à la compression uniaxiale à 28 jours (MPa)
2%	30,8
4%	32,2
6%	28,9
8%	30,6

La Figure 2.17 montre les résultats de la résistance à la compression du béton ordinaire et des bétons composés de 4% de poudres de palourde et de coque calcinées (Olivia et al., 2017). En effet, la résistance du béton contenant 4% de la poudre de palourde a augmenté respectivement de 3%, 5% et 2% à 7, 28 et 91 jours, par rapport au béton ordinaire. Cette augmentation pourrait être due à la teneur élevée en CaO et à l'affinage des pores à la suite de l'addition du filler calcaire. Par ailleurs, la résistance du béton contenant 4% de la poudre de coque a diminué respectivement de 3%, 5% et 5% à 7, 28 et 91 jours, par rapport au béton ordinaire.

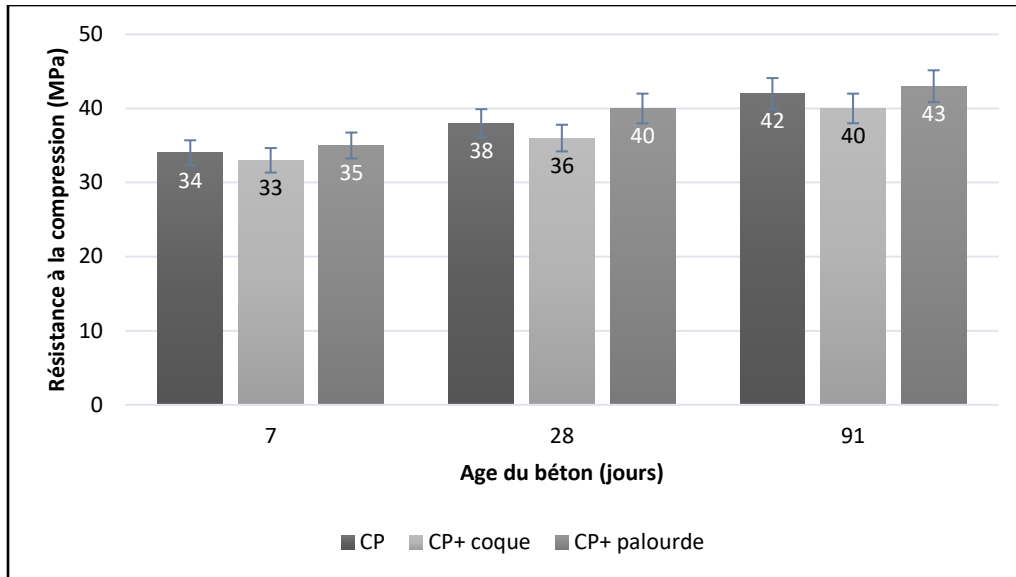


Figure 2.17. Résistance à la compression du béton ordinaire et du béton contenant 4% de la poudre de coquilles à 7, 28 et 91 jours (Olivia et al., 2017)

Chin-Peow et al. (2015) ont investigué l'effet de la substitution du sable naturel par les coquilles concassées pour confectionner des mortiers. Les coquilles utilisées étaient les coques et les moules provenant de Johor, Malaisie. Les coquilles concassées possédaient la même granulométrie que celle du sable naturel ($< 850 \mu\text{m}$). Au total, 45 échantillons cubiques de dimension $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ont été préparés. Les chercheurs ont fait varier le taux de remplacement du sable de 35%, 50%, 75% et 100%. De plus, le rapport E/C variait en fonction de la nature de la poudre de coquilles et de la quantité de cette poudre et était plus faible pour les mélanges de référence. La résistance à la compression uniaxiale a été déterminée à 7 et à 28 jours selon la norme ASTM C109. Le Tableau 2.7 traduit les formulations adoptées.

Tableau 2.7. Formulations des mélanges de mortiers (Chin-Peow et al., 2015)

Type du mélange	E/C	Masse volumique (kg/ m ³)
Référence	0,566	2092
Coque 25%	0,591	2180
Coque 50%	0,629	2236
Coque 75%	0,600	2288
Coque 100%	0,600	2324
Moule 25%	0,567	1988
Moule 50%	0,654	2128
Moule 75%	0,643	2084
Moule 100%	0,614	1980

Les résultats obtenus, résumés dans la Figure 2.18, ont montré que la résistance des mortiers contenant les coquilles de coque concassées a augmenté respectivement de 19%, 27%, 44% et 36% à 7 jours et de 2%, 19%, 19% et 20%, à 28 jours par rapport aux mortiers témoins, pour les taux de remplacement respectifs. Toutefois, pour les mortiers contenant les moules concassées, les chercheurs ont noté une réduction importante de la résistance. En effet, celle-ci a diminué respectivement de 21%, 49%, 60% et 77%, à 7 jours, et de 34%, 55%, 65% et 76%, à 28 jours, pour les taux de remplacement respectifs. Cette diminution a été attribuée à la géométrie des moules concassées possédant des arêtes vives et une surface lisse. Par conséquent, les chercheurs ont proposé d'utiliser ces coquilles dans les mortiers pour les enduits.

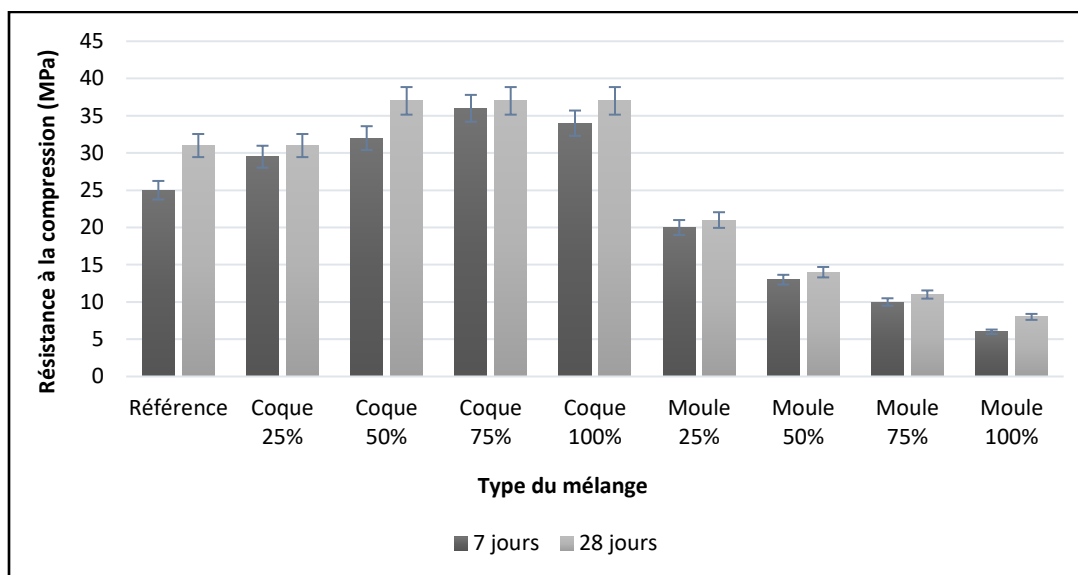


Figure 2.18. Résistance à la compression des mortiers contenant les coquilles concassées (Chin-Peow et al., 2015)

Edalat-Behbahani et al. (2019) ont substitué entièrement le sable naturel par les coquilles de coque concassées provenant d'Iran, pour produire des mortiers. Les chercheurs ont considéré un rapport E/C = 0,45. La résistance à la compression a été déterminée aux échéances de 3, 7, 11 et 28 jours. Les résultats ont montré que la résistance en compression a augmenté avec l'âge des mortiers. Toutefois, elle a diminué par rapport aux témoins. Cette réduction a été plus importante à jeune âge. A titre d'exemple, la résistance a diminué de 35% et de 18% respectivement à 7 et à 28 jours, par rapport aux mortiers de référence (Figure 2.19). Les auteurs ont attribué cette diminution de résistance à la faible absorption d'eau des coquilles (2,28%) par rapport à celle du sable naturel utilisé (2,62%).

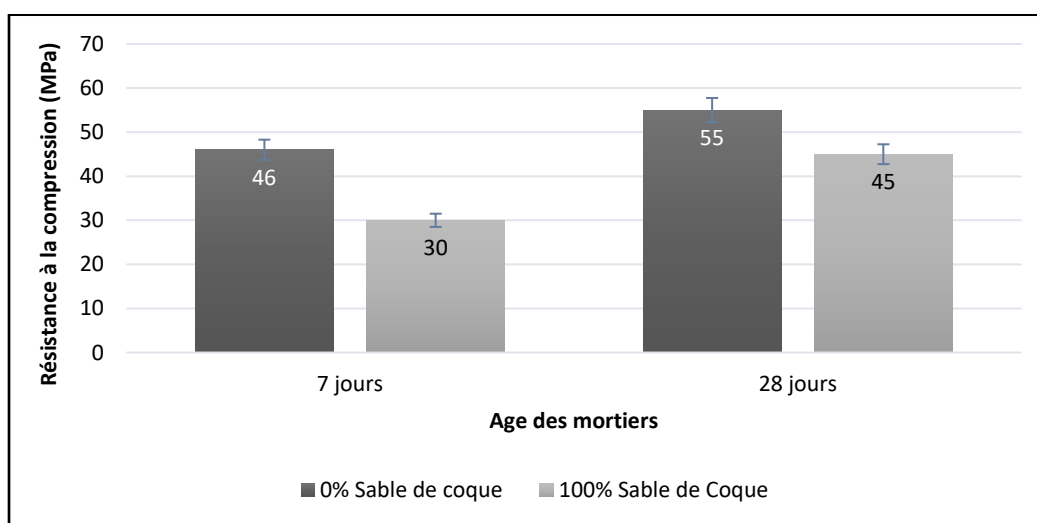


Figure 2.19. Résistance à la compression des mortiers contenant les coquilles de coque (Edalat-Behbahani et al., 2019)

Yusof et al. (2011) ont étudié la possibilité de valoriser les coquilles de palourde provenant de Kampung Merdang, Kota Samarahan en Malaisie, dans la formulation du béton. Ainsi, les coquilles ont été collectées des marchés locaux. Ensuite, le sable ordinaire dans le béton a été remplacé par ces coquilles concassées, à différents taux de remplacement (10%, 20% et 30%). Les résultats obtenus ont montré que la résistance à la compression à 28 jours du béton de référence était de 37 MPa. En ajoutant 10% de palourde pour remplacer le sable, la résistance a augmenté de 7,5%. Cependant, en incorporant 20% de ces coquilles dans le béton, la résistance a diminué pour atteindre 38 MPa en restant tout de même supérieure à la résistance du béton ordinaire. Par ailleurs, le remplacement du sable ordinaire par 30% de coquilles de palourde a permis d'obtenir des résistances à la compression plus élevées que celles du béton témoin, avec une augmentation de 16%. La Figure 2.20 illustre les résultats obtenus.

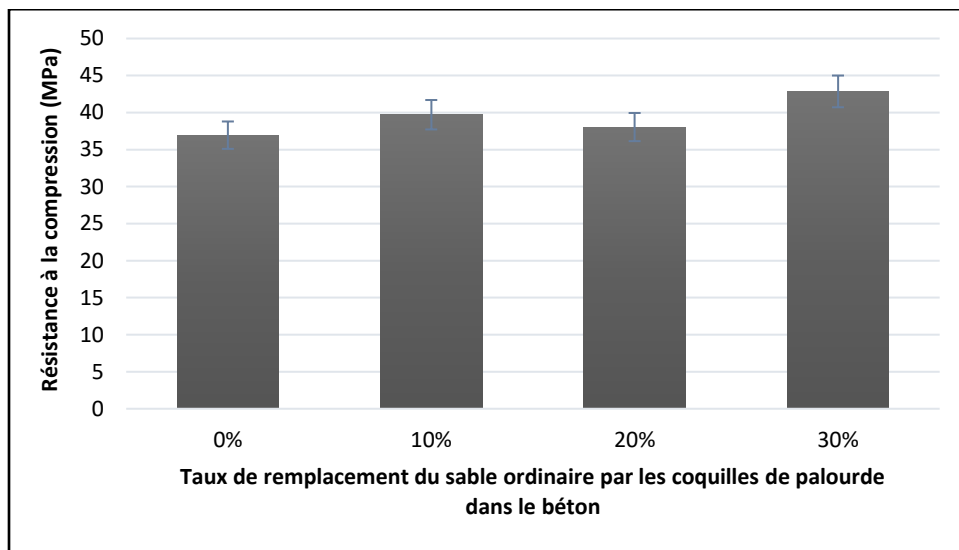


Figure 2.20. Résistance à la compression à 28 jours du béton en fonction du taux de remplacement du sable par les coquilles de palourde (Yusof et al., 2011)

La Figure 2.21 montre une synthèse publiée par Eziefula et al. (2018) de certains travaux de recherche où des granulats fins ont été remplacés par des coquilles. En effet, on constate que le remplacement de 5 à 30% de sable ordinaire par la poudre de coquilles de palourde a permis d'atteindre des résistances à la compression à 28 jours plus élevées que celles du béton ordinaire. De plus, pour un taux de remplacement égal à 30 %, on constate une augmentation de 28%. Néanmoins, au-delà de 30%, la résistance a eu tendance à diminuer. A titre d'exemple, pour un taux de substitution de 100% de sable ordinaire par les coquilles de bigorneau et de moules, il y a eu une diminution de 80%, par rapport à celle du béton ordinaire. Cette réduction pourrait être due à l'absorption d'eau élevée des coquilles et à la présence de matière organique.

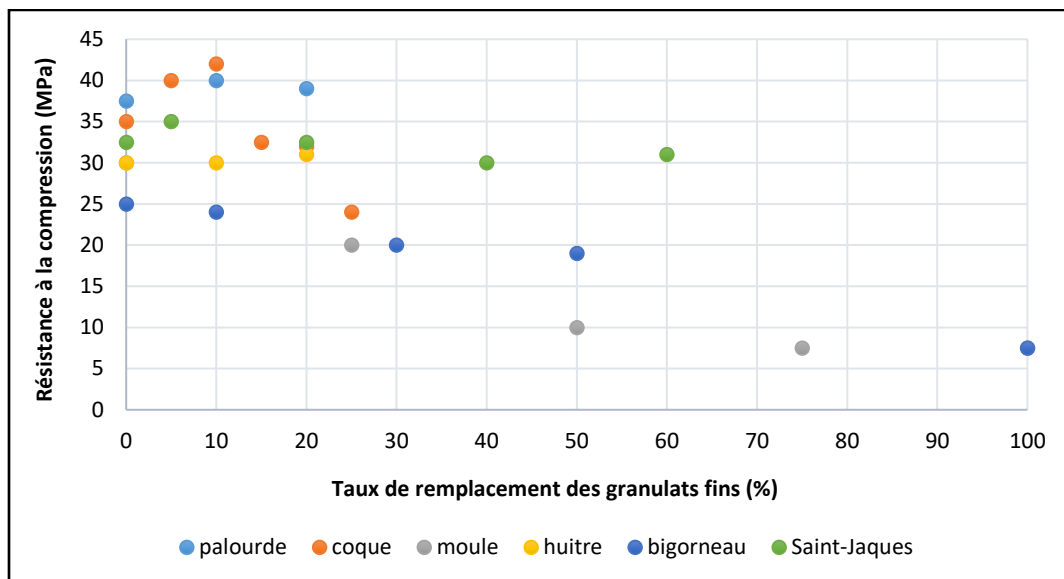


Figure 2.21. Résistance à la compression du béton contenant des granulats fins de coquilles à différents taux de remplacement (Eziefula et al., 2018)

En outre, la Figure 2.22 résume également les résultats rapportés par différents chercheurs qui ont remplacé les granulats grossiers par des coquilles. Ainsi, le remplacement de 5 à 20% des granulats grossiers par les coquilles de coque dans le béton a permis d'obtenir des résistances plus élevées que celles du béton de référence. En effet, pour un taux de remplacement égal à 20 %, on constate une augmentation de la résistance de 40%, à 28 jours. Cette augmentation a été expliquée par la meilleure liaison entre la pâte et les granulats.

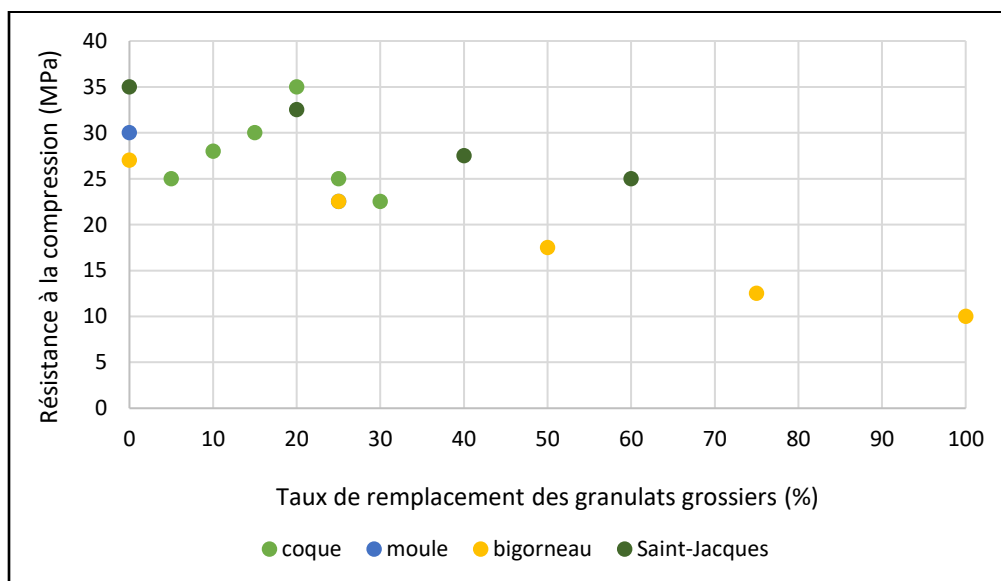


Figure 2.22. Résistance à la compression du béton contenant des granulats grossiers de coquilles à différents taux de remplacement (Eziefula et al., 2018)

2.2.4.2. Résistance à la traction

La résistance à la traction a été déterminée par différents auteurs afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des poudres de coquilles dans le béton. Le Tableau 2.8 montre les résistances à la traction des bétons incorporant la poudre des coquilles de coque et de palourde dans le ciment. On constate que la résistance a augmenté avec le temps. En plus, Othman et al. (2013) ont rapporté que la résistance à la traction du béton contenant 4% de poudre de coque a augmenté respectivement de 2%, 11% et 10% à 7, 28 et 90 jours, par rapport à celle du béton de référence. La résistance a été déterminée sur 54 cylindres 100x150mm selon la norme britannique BS EN 12390-6 :2009. En revanche, Olivia et al. (2017) ont démontré que la résistance du béton contenant 4% de poudre de palourde a diminué respectivement de 7% et 8% à 7 et 90 jours, par rapport à celle du béton témoin. Les chercheurs ont réalisé l'essai sur des cylindres 100x200mm, selon la norme nationale d'Indonésie SNI 03-2491-2002.

Tableau 2.8. Résistance à la traction des bétons

Types de coquilles	Taux de remplacement optimal (%)	Résistance des échantillons témoins (MPa)			Résistance à la traction (MPa)		
		7 jours	28 jours	90 jours	7 jours	28 jours	90 jours
Coque^a	4	4,5	5,5	6,1	4,6	6,1	6,7
Palourde^b	4	2,7	3,3	3,6	2,5	3,6	3,3

Source: ^a(Othman et al., 2013), ^b (Olivia et al., 2017)

La Figure 2.23 montre les résultats de la résistance à la traction du béton ordinaire et des bétons composés de 4% de poudre de coquilles de palourde et de coquilles de coque (Olivia et al., 2017) à 7, 28 et 91 jours. On constate une augmentation progressive de la résistance à la traction des trois types de béton. Les résultats ont montré toutefois que la résistance du béton ordinaire est plus élevée que celle des bétons contenant les coquilles. En effet, en ajoutant 4% de poudre de coque, la résistance a diminué respectivement de 35%, 6% et 11% à 7, 28 et 91 jours, par rapport au béton témoin. De plus, en remplaçant 4% du ciment par la poudre de palourde, la résistance a diminué respectivement de 29%, 3% et 8% à 7, 28 et 91 jours.

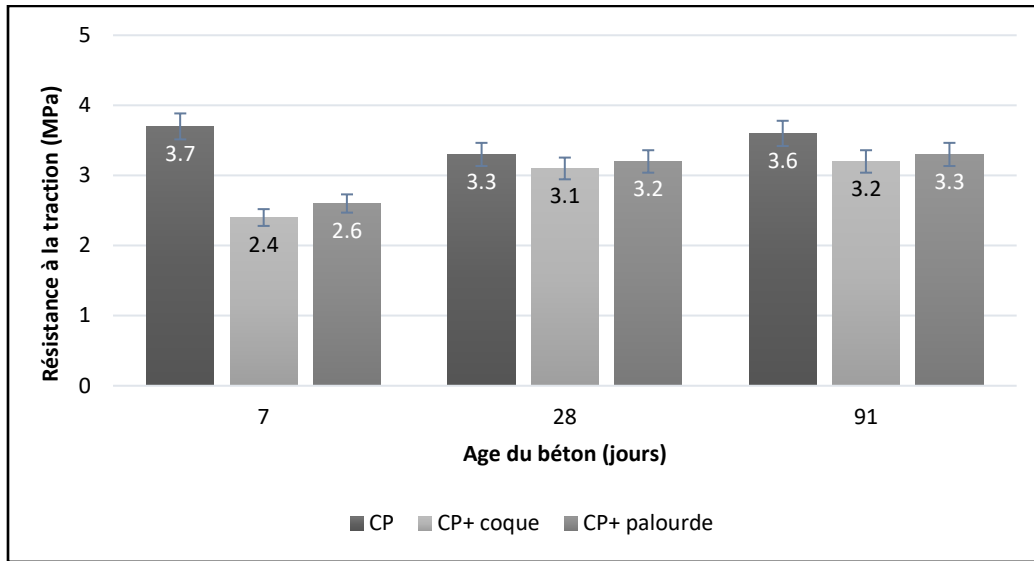


Figure 2.23. Résistance à la traction du béton ordinaire et du béton aux coquilles (Olivia et al., 2017)

La Figure 2.24 illustre la variation de la résistance à 28 jours du béton contenant des coquilles pour remplacer les granulats, à des taux de remplacement variés. Cette substitution a contribué généralement à une diminution de la résistance à la traction du béton, à 28 jours. Toutefois, un remplacement du sable allant à 20% par les coquilles d’huître a permis d’améliorer la résistance de 10%, à 28 jours (Eziefula et al., 2018).

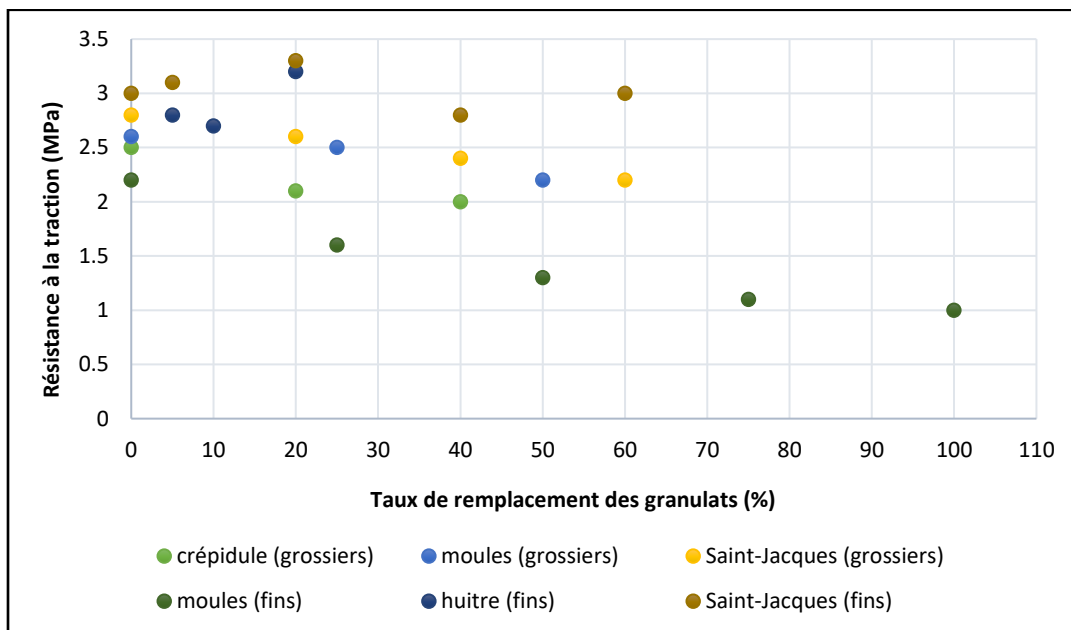


Figure 2.24. Résistance à la traction à 28 jours du béton contenant des granulats de coquilles à différents taux de remplacement (Eziefula et al., 2018)

2.2.4.3. Module d'élasticité

Olivia et al. (2015) ont déterminé le module d'élasticité à 7, 28 et 91 jours pour le béton ordinaire et le béton contenant 4% poudre de coque. Les résultats obtenus ont montré que le module d'élasticité du béton des coquilles était légèrement inférieur à celui du béton ordinaire. En effet, on constate qu'il y a eu une diminution de 16%, 8% et 6% à 7, 28 et 90 jours. Ceci indique la lenteur du développement des résistances du béton contenant la poudre des coquilles. Cela est probablement dû à la présence de quantités élevées de CaO. Le Tableau 2.9 résume les résultats qui ont été publiés.

Tableau 2.9. Module d'élasticité du béton

Référence	Taux de remplacement de la poudre dans le ciment	Module d'élasticité (GPa)		
		7 jours	28 jours	90 jours
(Olivia et al., 2015)	0%	24	25	26
	4%	20	23	24

Yang et al. (2010) ont montré que le module d'élasticité a diminué quand les granulats ont été remplacés par les coquilles concassées. En effet, la substitution de 20% des granulats par de coquilles d'huître a engendré une diminution de 10 à 15% du module d'élasticité du béton. De même, Martínez-García et al. (2017) ont rapporté que pour un taux de remplacement des granulats de 50%, le module d'élasticité a été réduit de 50%.

2.3. Valorisation des sédiments de dragage dans le béton

2.3.1. Introduction

Les sédiments de dragage sont les produits de l'extraction des sédiments qui se sont déposés sur les fonds d'un plan d'eau, lors de l'opération de dragage. Ils sont constitués de phases minérales, organique et liquide. L'opération de dragage est indispensable pour plusieurs raisons. Ainsi, la Figure 2.25 schématise les différentes utilisations du dragage.

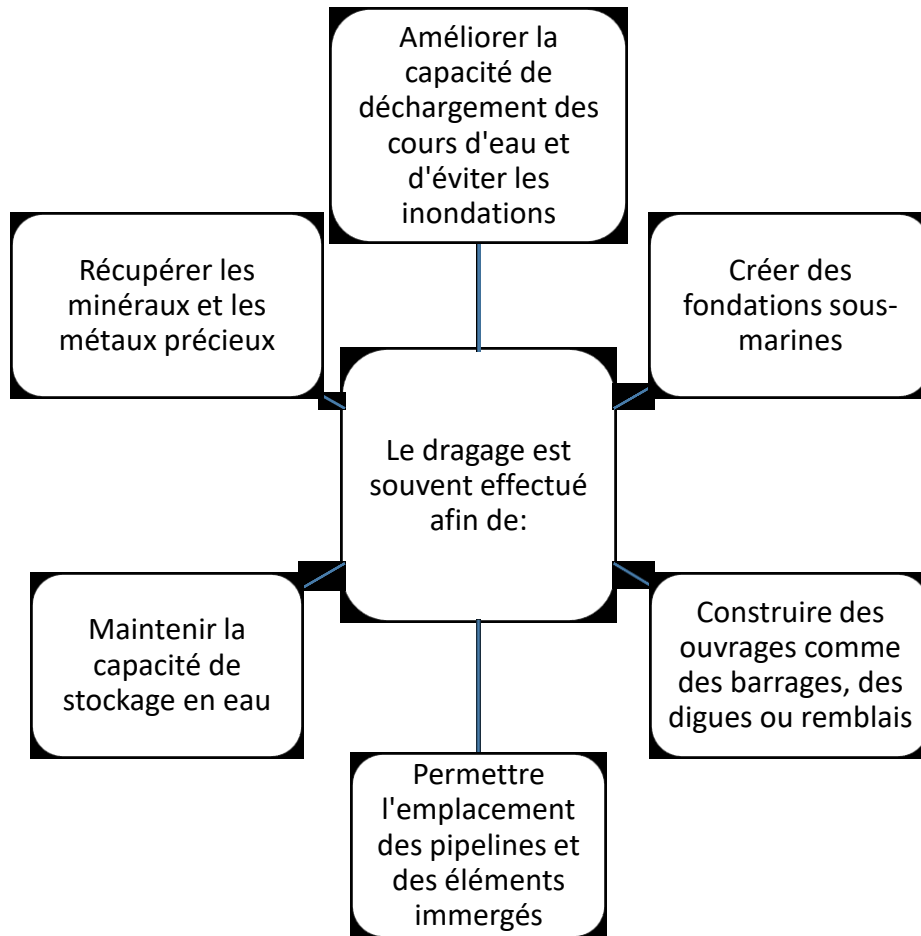


Figure 2.25. Les objectifs du dragage

2.3.2. Utilisation des sédiments de dragage dans le béton

Généralement, les sédiments dragués sont stockés dans les sites d'enfouissement ou déchargés dans des mers plus profondes. Toutefois, d'autres alternatives ont été proposées afin de valoriser ces sédiments dans le génie civil. En effet, la gestion durable et la transformation des sédiments dragués de déchets à une ressource constitue aujourd'hui un enjeu important. Par conséquent, plusieurs chercheurs ont montré la faisabilité de remplacer les matériaux de construction par les sédiments de dragage.

Dans ce contexte, Limeira et al. (2012) ont publié une étude pour valoriser le sable de dragage provenant du port de Sant Charles de Rapita, Tarragone. Les résultats de cette étude se résument comme suit :

- Plus de 70% du sable étudié passe à travers un tamis # 250 μm ;
- L'emplacement du sable dragué a une influence directe sur sa composition et sur sa contamination ;

- L'ajout de 50% de ce sable a produit une énorme perte de fluidité dans le béton;
- Le remplacement du sable ordinaire par le sable de dragage dans le béton a prouvé que les propriétés mécaniques sont similaires à celles du béton ordinaire ;

En Tunisie, Ben Othman et al. (2014) ont incorporé deux types de sable de dragage dans le béton de sable compacté au rouleau utilisé pour le corps de chaussées, avec des pourcentages respectifs de 60% et 40%. On rappelle que le béton de sable est composé de sable, de fines, de ciment et d'eau. D'autres additions spécifiques (fibres, adjuvants, etc.) peuvent être ajoutées à cette composition. Le premier sable utilisé provenait du port de la Goulette-Radès. Ce port présente le plus grand volume des sédiments marins dragués en Tunisie et est concerné par les plus grandes quantités d'échanges commerciaux. Le sable provenant de ce port est très peu pollué d'où sa réutilisation ne nécessite aucun traitement. Le deuxième sable utilisé provenait de la carrière de Djebel Oust du nord du pays. L'essai de lixiviation a été réalisé en vue d'étudier le risque de lixiviation des éléments toxiques. Les résultats trouvés ont respecté les exigences de la norme et sont montrés dans le Tableau 2.10.

Tableau 2.10. Résultats de l'essai de lixiviation (Ben Othman et al., 2014)

Élément	Cadmium	Cuivre	Plomb	Nickel	Zinc	Chrome	Arsenic	Mercure
Quantité (mg/l)	<0,005	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,01	<0,0002
Limite (mg/l)	0,005	0,5	0,1	0,2	5	0,5	0,05	0,001

De plus, des fibres synthétiques de type polypropylène ont été introduites dans ce béton pour remplacer le ciment. Le taux optimal de remplacement de ces fibres dans le ciment était égal à 2%. Ensuite, les propriétés mécaniques ont été déterminées. Les résultats du béton de sable compacté formulé ont été satisfaisants pour l'utilisation en technique routière.

Zri et al. (2009) ont montré la faisabilité d'utiliser le sable de dragage déposé à Capitainerie Ouest du Port de Dunkerque pour formuler un béton de sable. Ainsi, les auteurs ont abouti à un mélange optimal d'un béton de sable à base de sable de dragage tout en ajoutant des ajouts cimentaires à savoir le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les cendres volantes. Par conséquent, le béton de sable obtenu présentait des résistances mécaniques performantes avec une maniabilité fluide à plastique.

Plusieurs études ont montré que les sédiments de dragage marins peuvent être utilisés comme des matériaux alternatifs de construction. Cependant, ces sédiments contiennent généralement une quantité importante de sel. Ceci peut générer des problèmes de durabilité et induire la dégradation du béton armé par corrosion. D'ailleurs, les chlorures présents dans le sable de mer constituent la raison principale de limiter son utilisation dans les structures en béton armé. Dans ce contexte, Tang & Cui et al. (Tang & Cui, 2017) ont mis l'accent sur ce problème. Les chercheurs ont utilisé des sables de dragage provenant de deux ports locaux (SD-1 et SD-2). Afin de minimiser la quantité de sel, certains échantillons ont été lavés à l'eau douce dans une cuve pendant 60

minutes. Des mélanges de béton à base de sable ordinaire, de sable de dragage lavé et non lavé ont été réalisés.

La résistance à la compression uniaxiale a été déterminée à 7, 28 et 56 jours, tandis que le module d'élasticité et la résistance à la traction ont été déterminés après 28 jours. Ainsi, la résistance à la compression à 56 jours du béton contenant les sables de dragage a été supérieure de 2 à 20 % à celle du béton avec du sable ordinaire (Tableau 2.11).

La résistance à la traction des bétons fabriqués avec du SD-1 lavé ou non lavé présentait une variation inférieure à 5 % par rapport à ceux du béton avec du sable ordinaire. Cependant, la résistance à la traction des bétons avec SD-2 était supérieure à 22 % par rapport à celle du béton avec le sable ordinaire. De plus, il n'y avait pas de différence significative dans le module d'élasticité entre les mélanges de béton et les valeurs étaient comprises entre 27 et 28,5 GPa (Tableau 2.11).

La teneur en chlorure dans tous les échantillons du sable de dragage non lavé était nettement plus élevée, de 180 à 375 fois, que la teneur enregistrée dans le sable ordinaire. Le lavage prolongé à l'eau était efficace afin de réduire la teneur en chlorure dans les deux échantillons du sable de dragage. Toutefois, cette teneur des échantillons SD-2 après lavage était encore 35 fois plus élevée que celle du sable ordinaire (Tableau 2.11)

En se basant sur la teneur en chlorure, les auteurs ont déduit que les SD non lavés ne convenaient pas à la préparation du béton armé en raison du risque élevé de corrosion associée aux chlorures. D'ailleurs, les potentiels des échantillons de SD-2 non lavés, contenant une teneur en chlorures égale à 2,25 étaient inférieurs à -350mV indiquant une forte probabilité de corrosion, s'il y avait des armatures métalliques dans le béton.

Tableau 2.11. Teneur en chlorure des sables et propriétés mécaniques du béton à l'état durci (MPa) (Tang & Cui, 2017)

Sable utilisé	Teneur en chlorure (%)	Résistance à la compression f_c			Résistance à la traction f_t	Module d'élasticité (GPa)
		7 jours	28 jours	56 jours		
Sable ordinaire	0,006	32	44	46	3,35	27,8
SD-1-NL	1,080	33	46	47	3,30	27,5
SD-1-L	0,036	31	43	48	3,20	27
SD-2-NL	2,250	40	52	56	3,95	28,5
SD-2-L	0,214	38	51	53	3,9	28,2

SD : Sable de dragage, NL : Non lavé, L : Lavé

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1. Programme expérimental

Le présent chapitre est consacré à la description des procédures expérimentales et des essais réalisés en laboratoire afin de produire des matériaux cimentaires à base de coquilles de palourde et de sable de dragage performants et écologiques. La Figure 3.1 présente un récapitulatif du programme expérimental composé de trois phases. La phase I consiste à caractériser physiquement et minéralogiquement les coquilles de palourde. Cette phase permet d'acquérir une bonne connaissance des propriétés physico-chimiques des coquilles. La phase II traite les différentes formulations des pâtes de ciment réalisées ainsi que les paramètres étudiés. Ceci permet de vérifier l'effet de la poudre de palourde sur la réaction pouzzolanique. Enfin, la phase III traite la formulation des mortiers. D'une part, l'effet du taux de remplacement de la poudre de palourde dans le ciment sur la résistance à la compression uniaxiale, tout en utilisant le sable de dragage, sera étudié. D'autre part, le remplacement du sable naturel par les coquilles de palourde concassées sera abordé.

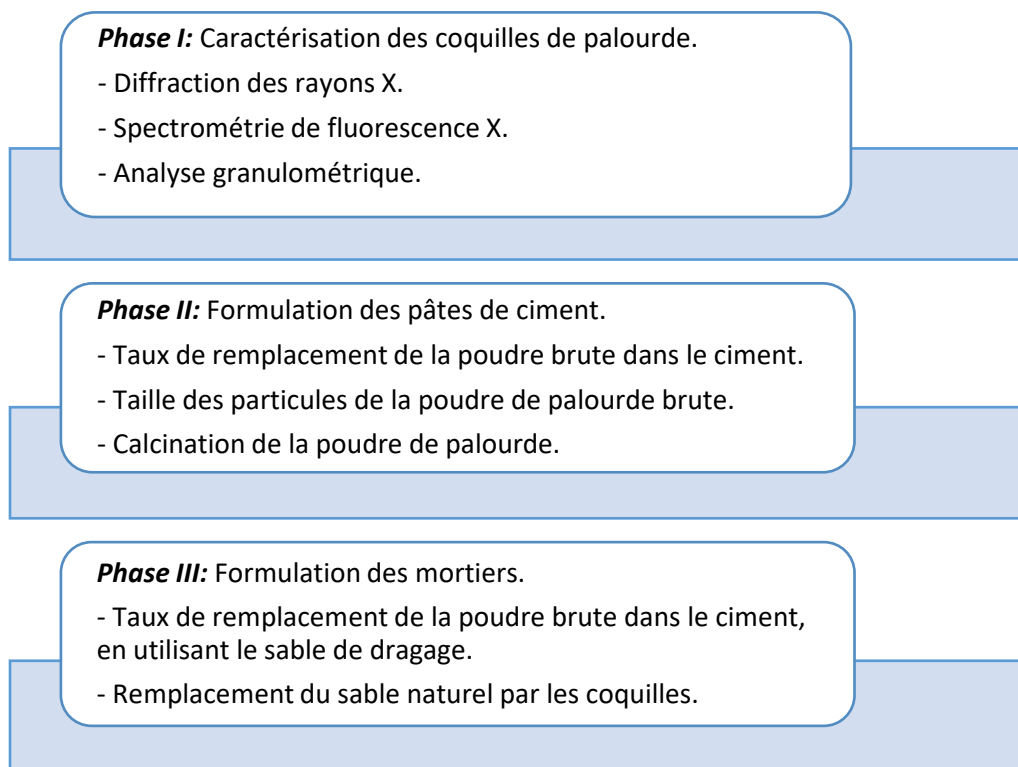


Figure 3.1. Diagramme du programme expérimental

3.2. Description des procédures expérimentales

3.2.1. Caractérisation du sable de dragage des IDM

En 2016, l'entreprise Dragage IM a envoyé à l'université de Sherbrooke des échantillons de sable provenant du Port de Pointe-Basse. Il y avait deux types de sable : contaminé (de couleur noire et vaseux), et du sable considéré comme propre illustré dans la Figure 3.2 (de couleur jaune/rouge et plutôt sableux). C'est ce dernier type de sable qui a été utilisé dans ce travail. Ce sable contient une faible proportion de matières organiques inférieure à la limite de 3% (ASTM C33).



Figure 3.2. Sable de dragage non contaminé des IDM

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, qui a été réalisée par Safhi (2020), a montré que ce sable de dragage est formé principalement des phases minérales suivantes : quartz, dolomite, halite, calcite et albite. Ce sable est composé de fines particules angulaires de composition siliceuse (Figure 3.3). Ces résultats ont illustré le grand potentiel de ce sable pour substituer le sable conventionnel dans le mortier.

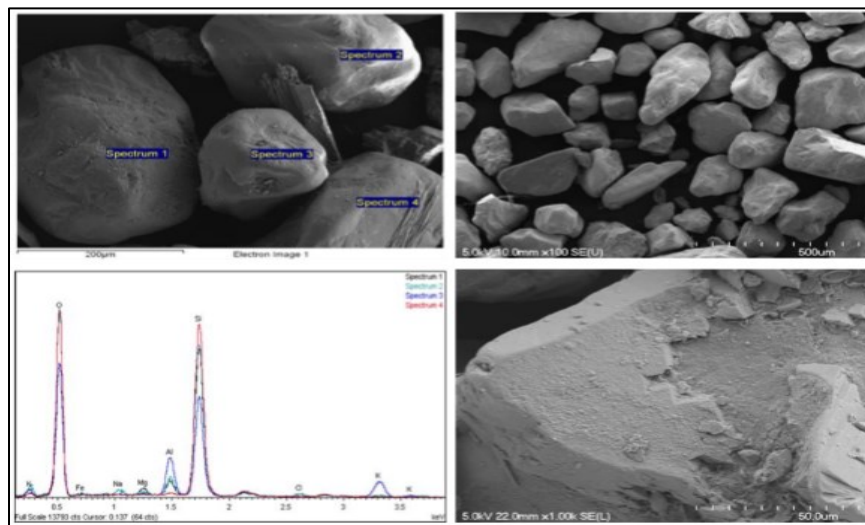


Figure 3.3. Observations au MEB du sable de dragage des IDM (Safhi, 2020)

3.2.2. Caractérisation des coquilles de palourde

3.2.2.1. Broyage des coquilles

Tout d'abord, les coquilles de palourde des IDM, représentées dans la Figure 3.4, ont été broyées.



Figure 3.4. Les coquilles de palourde des IDM

Le broyage a été effectué par un broyeur à boulets du laboratoire, qui est un cylindre fermé avec des ouvertures permettant à la matière d'entrer et de sortir du broyeur. Ce dernier est chargé de corps broyant en acier (Figure 3.5). Le processus de broyage des coquilles se manifeste par le mouvement de rotation provoquant des cascades et des cataractes de corps broyant sur les coquilles introduites. Le procédé de broyage a duré 25 minutes. Ce qui a permis d'obtenir une poudre de couleur gris clair. Par conséquent, on a procédé à la caractérisation de cette poudre. Ainsi, des essais de diffraction des rayons X et de fluorescence X ont été effectués pour la caractérisation chimique et une analyse granulométrique par tamisage pour la caractérisation physique de la poudre obtenue.



Figure 3.5. Broyeur à boulets

3.2.2.2. Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) permet d'identifier les phases minérales cristallines qui composent la poudre afin de prédire son comportement à long terme. L'identification des phases peut parfois être compliquée en raison de décalages des pics, de la variation des hauteurs relatives, de la faible quantité de certaines phases et de la superposition des pics. Soulignons qu'une poudre amorphe est caractérisée par l'absence de pics DRX et par la présence d'un halo de diffraction. Dans le cadre de ce travail, la DRX a été réalisée sur la poudre de palourde brute et sur la poudre calcinée à 800°C.

3.2.2.3. Fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire qui permet d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres, etc., sous forme solide ou liquide. La spectrométrie de fluorescence X a été réalisée sur la poudre de palourde brute et sur la poudre calcinée.

3.2.2.4. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet d'évaluer la distribution de la taille des particules du mélange broyé. Elle est définie par la norme ASTM C 136. Dans le cadre de ce travail, une analyse par tamisage visant à séparer les grains constituant la poudre selon leur taille, a été réalisée. En effet, l'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis la poudre en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

3.2.3. Formulations des pâtes de ciment

La pâte de ciment est à l'origine de la cohésion du béton. Elle est constituée de ciment anhydre, d'eau et d'éventuels additifs. Dans le cadre de ce travail, on a commencé par la formulation des pâtes de ciment en y incorporant la poudre de palourde. Ceci permettra de comprendre l'effet de cette poudre sur la réaction d'hydratation du ciment et sur le développement des résistances.

3.2.3.1. Préparation des mélanges

Afin de préparer les mélanges de pâtes de ciment, les moules cubiques ont été préparés en appliquant un léger film d'huile pour faciliter le démoulage. La Figure 3.6 illustre les moules utilisés.



Figure 3.6. Lubrification des moules cubiques de dimensions 50x50x50 mm

Le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur Hobart à axe vertical. La pale du malaxeur peut tourner à trois vitesses. Les actions du malaxage sont conformes à la norme ASTM 305-20 et sont comme suit :

- Placer la pale sèche et le bol sec en position de mélange dans le malaxeur.
- Introduire toute l'eau dans le bol du malaxeur ; y verser ensuite le ciment et laisser reposer pendant 30s (Figure 3.7) ;
- Démarrer le malaxeur et mélanger à faible vitesse (vitesse 1) pendant 30 s.



Figure 3.7. Mélanges de pâtes de ciment

- Arrêter le malaxeur pendant 15 s et racler toute pâte qui aurait pu s'accumuler sur les côtés du bol en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre le malaxage pendant 60 s à grande vitesse.
- Après avoir rempli les moules, faire un compactage mécanique à l'aide d'une table à choc et un compactage par piquage si nécessaire.
- Couvrir les moules par un film en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stocker les dans l'environnement du laboratoire (Figure 3.8).



Figure 3.8. Moulage des mélanges de pâtes

- Après 24h, démouler et conserver les échantillons dans l'eau et la chaux dans une salle de mûrissement à une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

3.2.3.2. Effet du taux de remplacement de la poudre dans le ciment

Tout d'abord, 24 échantillons de pâtes de ciment ont été confectionnés avec la poudre de coquilles de palourde non tamisée ($D < 315 \mu\text{m}$) et non calcinée obtenue après le broyage. En premier lieu, la poudre de palourde n'a pas été calcinée afin de minimiser les émissions de CO_2 , et certainement d'éviter les coûts liés au chauffage. Un rapport $E/C=0,45$ a été considéré et la quantité d'eau a été maintenue constante. Le ciment utilisé dans les mélanges était un ciment Portland à usage courant (type GU). L'eau de gâchage était l'eau potable du laboratoire de génie civil ayant un pH égal à 7. Cette eau est exempte de produits chimiques. Le taux de remplacement de la poudre dans le ciment a été varié de 5%, 10% et 15%, afin d'obtenir le taux optimal. Les formulations des mélanges de pâtes réalisées sont représentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Formulations de pâtes de ciment avec poudre de palourde non tamisée

Taux de remplacement (%)	Ciment (g)	Poudre brute (g)	Eau (g)
0%	1350	0	608
5%	1283	68	608
10%	1215	135	608
15%	1148	203	608

3.2.3.3. Effet de la taille des particules de la poudre

L'objectif ici consiste à optimiser la taille des particules de la poudre de palourde brute incorporée dans le ciment. Pour ce faire, 3 mélanges de pâtes ont été réalisés, en fixant un taux de remplacement de 5%. Dans ces mélanges, un rapport $E/C=0,45$ a été considéré. Le diamètre des particules de la poudre incorporée dans le ciment a été varié ($D < 80 \mu\text{m}$, $D < 160 \mu\text{m}$ et $D < 315 \mu\text{m}$). Donc, au total 18 échantillons ont été préparés. Les formulations réalisées sont résumées dans la Figure 3.9.

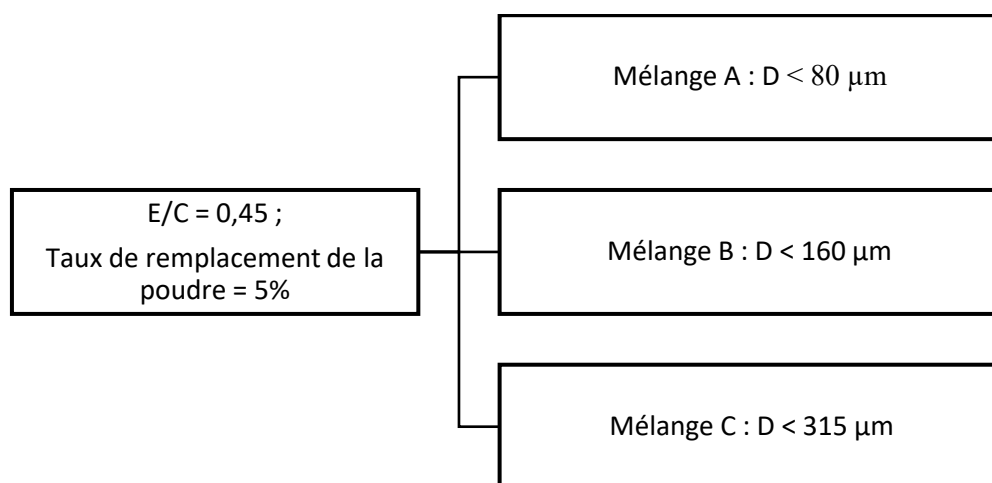


Figure 3.9. Effet de la taille des particules de la poudre de palourde brute sur les mélanges de pâtes de ciment

Le Tableau 3.2 illustre les formulations des mélanges de pâtes de ciment.

Tableau 3.2. Formulations de pâtes de ciment avec la poudre de palourde tamisée

Mélange	Ciment (g)	Poudre (g)	Taille des particules	Eau (g)
A	1283	68	D < 80 µm	608
B	1283	68	D < 160 µm	608
C	1283	68	D < 315 µm	608

3.2.3.4. Effet de la calcination de la poudre

La calcination de la poudre des coquilles à une température bien définie permet de transformer cette poudre en une cendre. De plus, elle permet de réduire la matière organique (déterminée par la perte au feu). Le processus de calcination a été réalisé dans un four (Figure 3.10).



Figure 3.10. Calcination de la poudre de palourde dans le four

Durant la calcination, le CaCO_3 se décompose en CO_2 et en oxyde de calcium CaO . Dans le cadre de ce travail et en se basant sur la synthèse bibliographique, la poudre de palourde a été calcinée à une température égale à 800°C permettant de décomposer le CaCO_3 .

Afin d'évaluer l'effet de la calcination de la poudre de palourde sur l'hydratation du ciment et sur le développement des résistances, des mélanges de pâtes avec la poudre calcinée ont été réalisés. En effet, 24 échantillons ont été préparés où le taux de remplacement de cette poudre dans le ciment a été varié de 5%, 10% et 15%. La taille des particules de la poudre de palourde était comme suit : $[1/3 (D < 80 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 160 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 315 \mu\text{m})]$. L'essai de compression uniaxiale a été réalisé exceptionnellement à 9 jours et à 34 jours. Les mêmes formulations des pâtes de ciment confectionnées auparavant dans la section 3.2.3.2 avec la poudre brute ont été adoptées, pour comparer les résultats et interpréter l'influence de la poudre calcinée sur la réaction pouzzolanique.

3.2.3.5. Microstructure de la pâte de ciment hydratée

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon tout en utilisant le principe des interactions électron-matière. Cette technique consiste à faire converger un faisceau d'électrons sur l'échantillon. Ce bombardement d'électrons provoque l'apparition de signaux différents qui fournissent des informations sur la nature de l'échantillon (Figure 3.11).

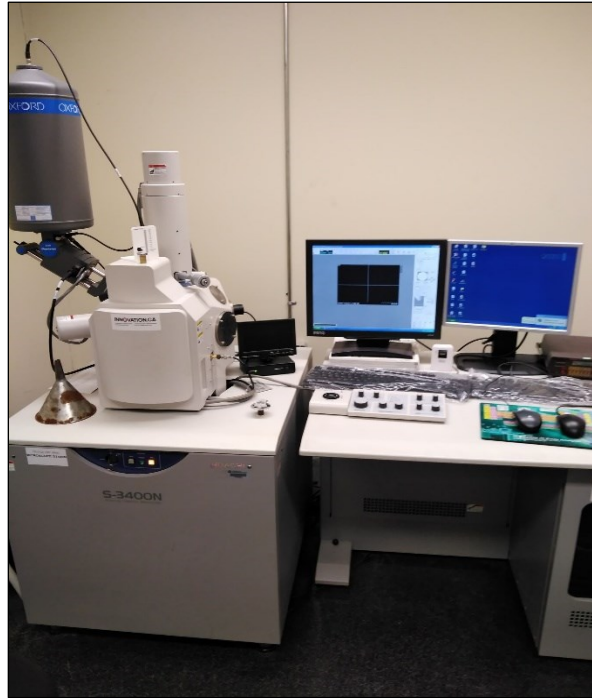


Figure 3.11. Microscope électronique à balayage

Cette technique a été utilisée afin de visualiser la texture interne et le développement des réactions d'hydratation dans la pâte de ciment durcie, et donc de comprendre l'effet de l'incorporation de la poudre dans le ciment sur la réaction pouzzolanique. Les échantillons doivent être préparés avant d'être visualisés avec le MEB. Les normes ASTM C1723 – 16 et ASTM C457/C457M – 16 décrivent les étapes de cette préparation.

- L'échantillon est séché puis enrobé à froid dans de la résine époxy. Les résines époxy polymérisent par une réaction chimique. Une fois durcie, l'époxy n'est pas affecté par la chaleur modérée ou les produits chimiques. Ensuite il est placé dans un moule.
- Démoulage et découpage des échantillons à l'aide de la scie au diamant permettant d'effectuer la découpe des encapsulations d'époxy pour l'observation en microscopie électronique à balayage.
- Le pré-polissage pour éliminer les irrégularités de surface. L'objectif est d'obtenir une surface plane avec un minimum de dommages pouvant être éliminés facilement et le plus rapidement possible lors du polissage. Pour cela, un papier SiC est utilisé.
- Le polissage est accompli par étapes successives à l'aide de particules abrasives de plus en plus fines. Ensuite, un nettoyage à l'éthanol est réalisé.
- Les échantillons sont métallisés à l'aide d'un métalliseur. La métallisation assure que tout échantillon introduit dans un microscope électronique à balayage soit conducteur afin de

contrer les effets de charge en imagerie pouvant même aller jusqu'à rendre l'observation impossible.

3.2.4. Formulations des mortiers

Dans une première partie, des mortiers ont été confectionnés afin d'étudier l'effet du taux de remplacement de la poudre de palourde brute dans le ciment (5% et 10%), tout en utilisant le sable de dragage au lieu du sable ordinaire. Dans une deuxième partie, des mélanges de mortiers ont été formulés, en remplaçant le sable ordinaire par les coquilles concassées (50% et 100%), et en remplaçant, en même temps, 5% du ciment par la poudre de palourde non calcinée. Ainsi, dans cette section, les procédures de la préparation des mélanges et les différents paramètres étudiés sont décrits.

3.2.4.1. Préparation des mélanges

Afin de préparer les mélanges de mortiers, les moules cubiques ont été préparés en appliquant un léger film d'huile pour faciliter le démoulage. Les actions du malaxage sont conformes à la norme ASTM C305-20.

- Introduire l'eau dans Le bol du malaxeur. Ensuite, ajouter le ciment et démarrer le malaxeur à vitesse lente, pendant 30 secondes (Figure 3.12).



Figure 3.12. Confection des mélanges de mortiers

- Ajouter lentement le sable sur une période de 30 s tout en mélangeant à faible vitesse. Arrêter le malaxeur et passer à la vitesse moyenne pendant 30 s.
- Arrête le malaxeur et laisser reposer le mortier pendant 90 s. Pendant les 15 premières secondes de cet intervalle, raclez rapidement tout mortier qui aurait pu s'accumuler sur le côté du bol ; puis, couvrir le bol avec le couvercle.
- Terminer en mélangeant pendant 60 s à vitesse moyenne.

- Remplir les moules cubiques et procéder à un compactage mécanique à l'aide d'une table à choc.
- Couvrir les moules par un film en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stocker-les dans l'environnement du laboratoire. Après 24h, démouler et conserver les échantillons dans l'eau et la chaux dans une salle de mûrissement à une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

3.2.4.2. Effet du taux de remplacement de la poudre dans le ciment

Des mélanges de mortiers ont été préparés en combinant l'utilisation de la poudre de palourde non calcinée et du sable de dragage des IDM. Le ciment a été substitué partiellement par 5% et 10% de la poudre de palourde obtenue après les procédés de broyage et de tamisage, tout en remplaçant entièrement le sable ordinaire par le sable de dragage. Ainsi, 3 mélanges ont été réalisés (Figure 3.13). A titre d'indication, Safhi (2020) a rapporté que la formulation optimale des mortiers contenant 100% de sable de dragage des IDM, correspondait à un rapport E/C = 0,6 avec un ratio C/S = 0,4. Elle a permis de formuler des mélanges possédant un comportement mécanique proche de celui des mortiers conventionnels. Donc, cette formulation a été adoptée dans les mélanges suivants.

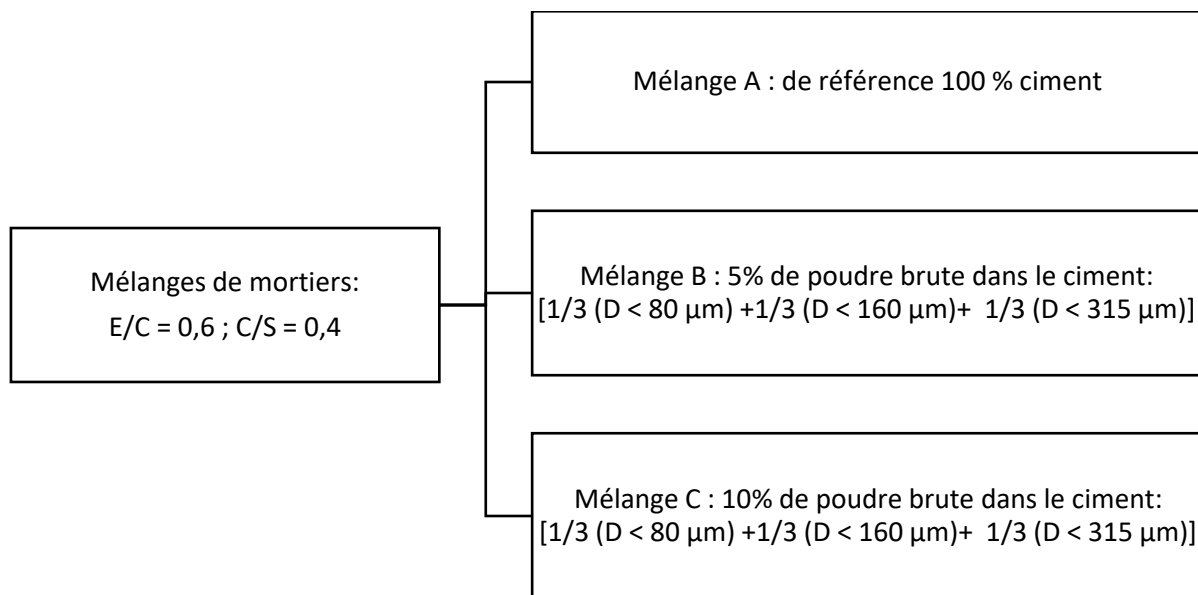


Figure 3.13. Mélanges de mortiers à base de sable de dragage

Le Tableau 3.3 représente les formulations des mortiers de ciment avec la poudre de palourde tamisée non calcinée et préparés avec du sable de dragage.

Tableau 3.3. Formulations de mortiers à base de sable de dragage

Mélange	Ciment (g)	Poudre (g)	Sable (g)	Eau (g)
A	450	0	1125	270
B	427	23	1125	270
C	405	45	1125	270

3.2.4.3. Remplacement du sable ordinaire par le sable de coquilles

L'objectif ici consiste à utiliser les coquilles concassées pour remplacer une partie du sable ordinaire. Pour ce faire, les différentes fractions normalisées des coquilles concassées ont été mélangées, en vue d'obtenir des granulats fins ayant une courbe granulométrique similaire à celle du sable naturel utilisé. La Figure 3.14 illustre les coquilles de palourde concassées utilisées pour remplacer le sable naturel et formuler les mélanges de mortiers.



Figure 3.14. Les coquilles de palourde concassées utilisées

Par la suite, 3 mélanges de mortiers ont été préparés en faisant varier le taux de remplacement du sable de palourde, mais aussi en remplaçant 5% du ciment par la poudre de palourde non calcinée. Ce qui a permis d'étudier l'effet de synergie entre la poudre de palourde comme filler dans le ciment et le sable de ces coquilles (Figure 3.15). Par conséquent, le premier mélange a été formulé avec 100% de sable ordinaire, le second mélange avec 100% de sable de coquilles et le troisième mélange avec 50% de sable ordinaire et 50% de sable de palourde, sachant que tous les mortiers formulés contiennent 5% de poudre non calcinée avec une taille des particules de la poudre comme suit : $[1/3 (D < 80 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 160 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 315 \mu\text{m})]$. Les paramètres de formulations utilisés sont préconisés par la norme ASTM C109, pour confectionner 6 cubes de mortiers par mélange. Donc, au total 18 cubes de mortiers ont été fabriqués (Tableau 3.4).

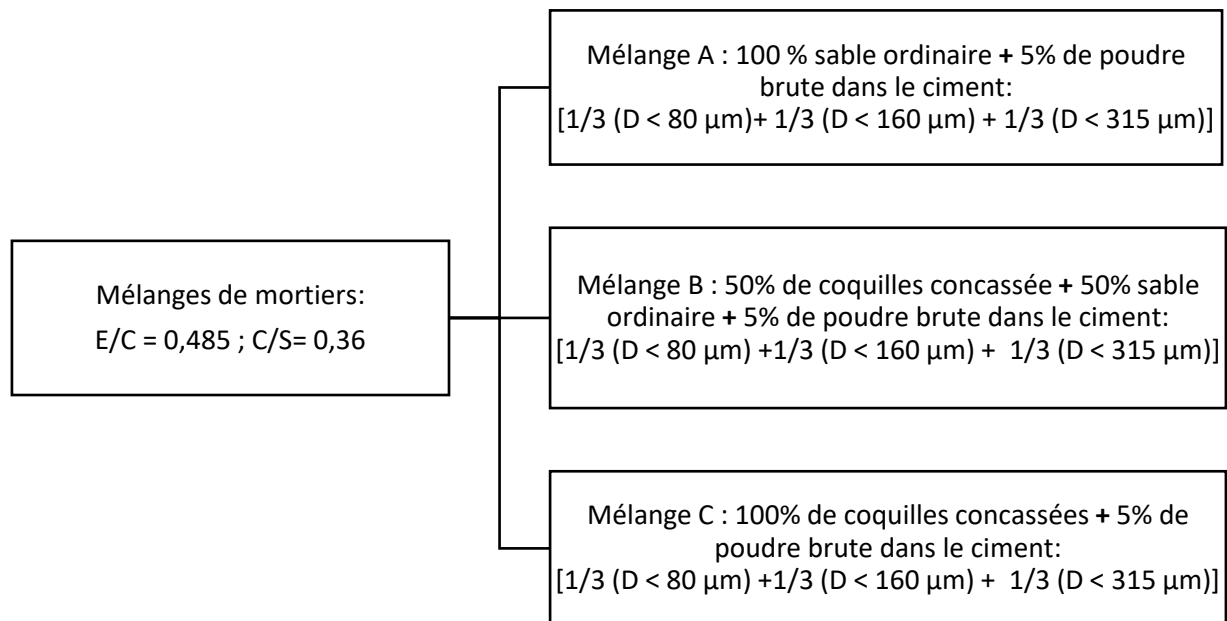


Figure 3.15. Mélanges de mortiers en utilisant les coquilles palourde concassées

Tableau 3.4. Formulations de mortiers en utilisant les coquilles de palourde concassées

Mélange	Taux de remplacement du sable (%)	Taux de remplacement du ciment (%)	Ciment Portland (g)	Poudre brute (g)	Sable naturel (g)	Coquilles concassées (g)	Eau (g)
A	0	5	475	25	1375	0	242
B	50	5	475	25	687,5	687,5	242
C	100	5	475	25	0	1375	242

3.2.5. Essai de compression uniaxiale

Les essais de compression uniaxiale ont été réalisés avec une presse mécanique (Figure 3.16). La résistance en compression simple est définie comme étant la résistance maximale du cube de dimensions 50 x 50 x 50 mm (ASTM C 109), soumis à une charge axiale. La charge de compression est appliquée jusqu'à ce que l'indicateur de charge montre que la charge diminue régulièrement et que l'échantillon se fracture. Pour chaque mélange confectionné, l'essai a été réalisé sur 3 échantillons à 7 jours et à 28 jours pour aboutir à la moyenne de la résistance. Une exception a été faite pour les mélanges de pâtes où l'essai de compression a été effectué à une échéance de 9 et 34 jours (coïncidence des échéances habituelles avec des jours de fêtes et donc le laboratoire était fermé).



Figure 3.16. Essai de compression uniaxiale sur des cubes

CHAPITRE 4

RÉSULTAS ET LEUR INTERPRÉTATION

4.1. Introduction

Ce chapitre dresse un bilan des résultats obtenus des différentes formulations et des essais réalisés en laboratoire. Tout d'abord, les résultats de la caractérisation de la poudre de palourde seront analysés, permettant de comprendre la composition physico-chimique de la poudre et d'anticiper son comportement dans le mortier. Puis, les propriétés mécaniques des différents mélanges confectionnés ainsi que les différents paramètres optimisés seront exposées.

4.2. Caractérisation de la poudre de palourde brute et calcinée

Après broyage des coquilles de palourde à l'aide du broyeur à boulets, une analyse chimique de la poudre obtenue, comportant la diffraction aux rayons X et la fluorescence X, a été réalisée. De plus, une analyse granulométrique, qui permettra d'utiliser les coquilles pour remplacer le ciment et le sable ordinaire, dans les matériaux cimentaires, a été également réalisée.

4.2.1. Résultats de la DRX

L'analyse minéralogique a été réalisée sur la poudre de coquilles de palourde brute et sur la poudre calcinée à 800°C. Les résultats obtenus sont représentés respectivement dans la Figure 4.1 et la Figure 4.2. Ainsi, le quartz (SiO_2) et le carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de calcite et d'aragonite ont été observées comme les phases principales de la poudre brute. En ce qui concerne la poudre calcinée, les phases principales qui ont été observées sont le carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de calcite et la portlandite (Ca(OH)_2). En outre, il n'y a pas eu vitrification à la suite de la calcination. Par conséquent, cette composition majoritaire de carbonate de calcium et de chaux hydratée justifie la possibilité d'utiliser la poudre de palourde brute ou calcinée comme un filler calcaire dans le ciment.

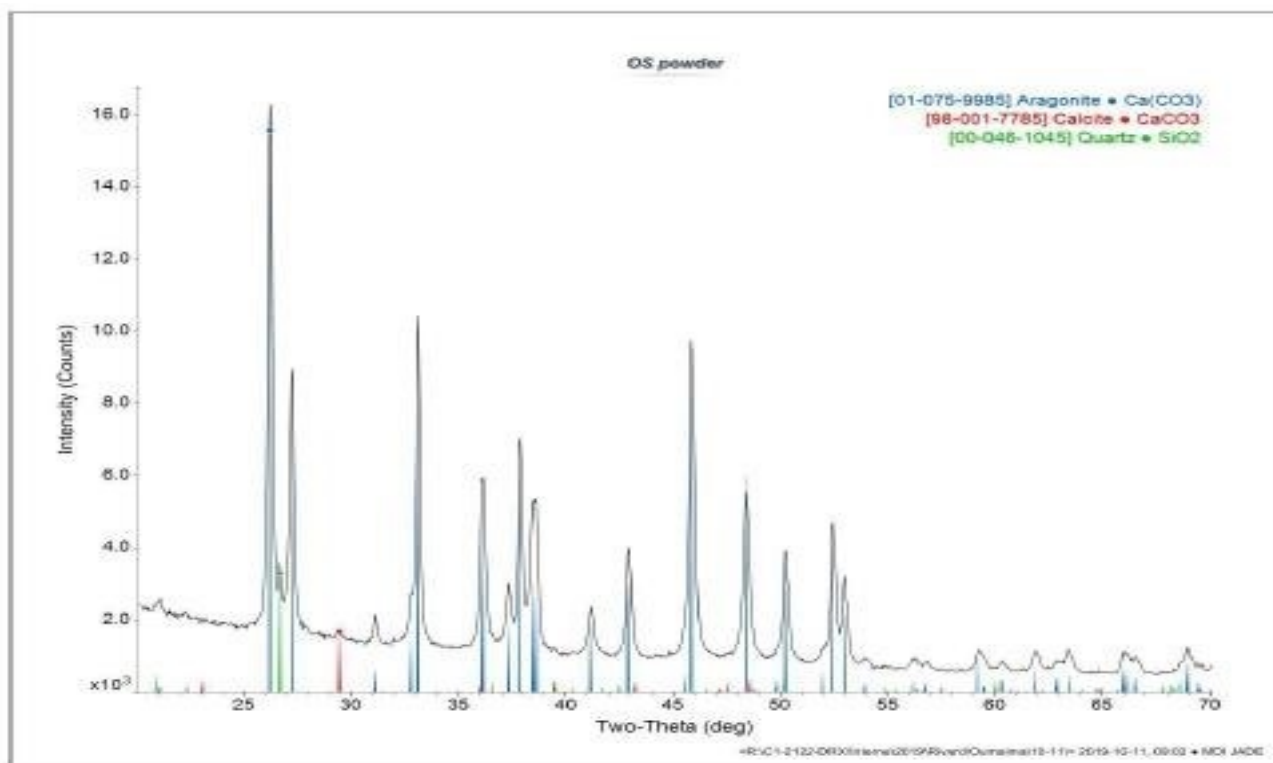


Figure 4.1. DRX de la poudre de palourde brute

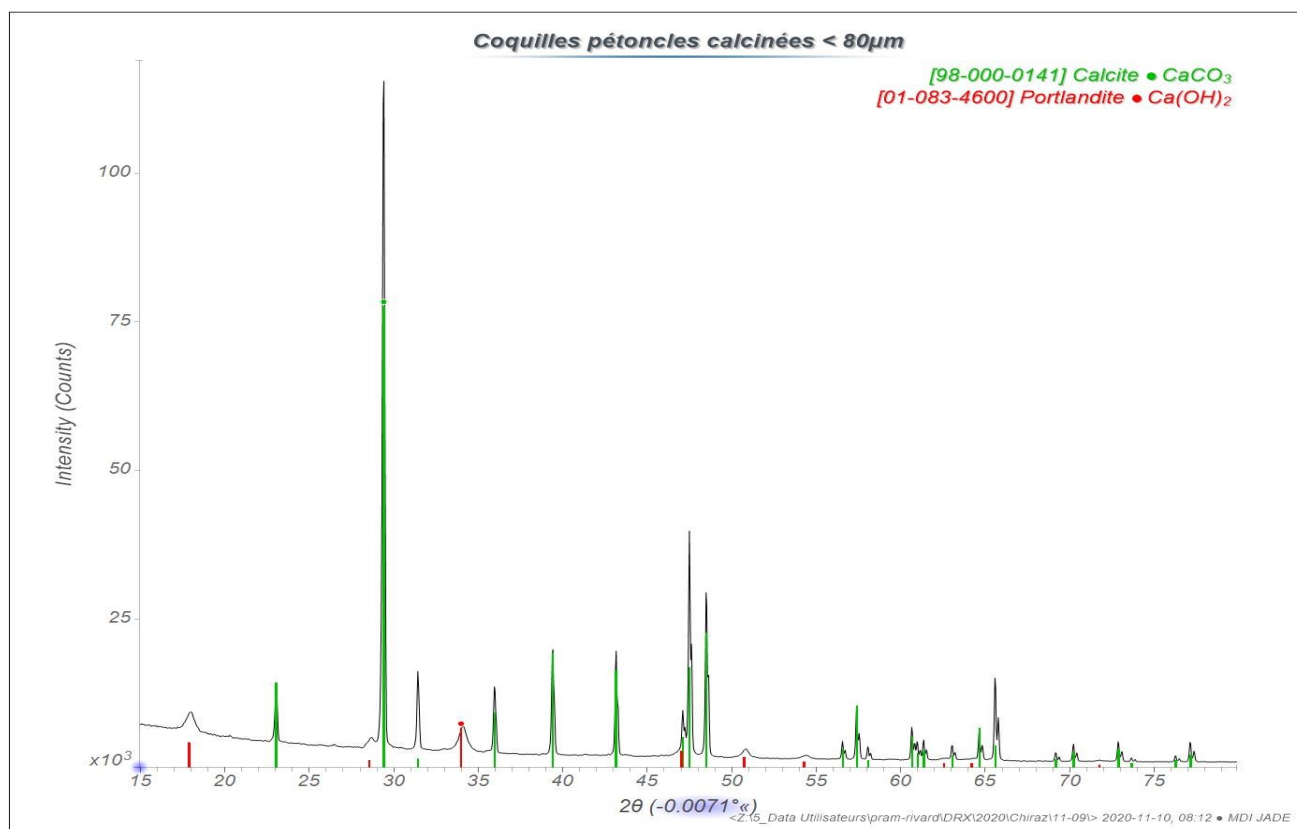


Figure 4.2. DRX de la poudre de palourde calcinée

4.2.2. Résultats de FRX

Les résultats de la fluorescence X ont montré que la poudre de palourde brute est formée de 93% de carbonate de calcium CaCO_3 avec des traces de silice. La quantité de SO_3 présente se situe dans la fourchette acceptable ou recommandée par l'ASTM, ne dépassant pas 3 %. Les résultats ont montré la présence de la matière organique avec une valeur de la perte au feu (PAF) de 44,3% (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. FRX de la poudre de palourde brute

Oxyde	% massique	Élément	% massique
Al_2O_3	0,2	Al	0,1
BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	51,7	Ca	36,9
Co_3O_4	0,0	Co	0,0
Cr_2O_3	0,0	Cr	0,0
CuO	0,0	Cu	0,0
Fe_2O_3	0,2	Fe	0,1
HfO_2	0,0	Hf	0,0
K_2O	0,0	K	0,0
MgO	0,1	Mg	0,1
Mn_2O_3	0,0	Mn	0,0
Na_2O	0,7	Na	0,5
NiO	0,0	Ni	0,0
P_2O_5	0,0	P	0,0
PbO	0,0	Pb	0,0
SO_3	0,2	S	0,1
SiO_2	1,1	Si	0,5
SrO	0,2	Sr	0,2
TiO_2	0,0	Ti	0,0
V_2O_5	0,0	V	0,0
WO_3	0,0	W	0,0
ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO_2	0,0	Zr	0,0
PAF = 44,34%			

Les résultats de la fluorescence X de la poudre de palourde calcinée ont montré qu'elle est composée de 56% de chaux hydratée Ca(OH)_2 avec des traces de silice. La quantité de SO_3 présente se situe dans la fourchette acceptable ou recommandée par l'ASTM, ne dépassant pas 3 %. On constate que la quantité de CaO a augmenté dans cette poudre par rapport à la poudre brute. Cela est accordé à la calcination qui transforme le CaCO_3 en CaO et en CO_2 . Les résultats ont montré que la PAF est égale à 41,8 %. Donc, la matière organique ne s'est pas complètement décomposée. Le Tableau 4.2 illustre les résultats obtenus.

Tableau 4.2. FRX de la poudre de palourde calcinée

Oxyde	% massique	Élément	% massique
Al_2O_3	0,1	Al	0,0
BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	56,2	Ca	40,1
Co_3O_4	0,0	Co	0,0
Cr_2O_3	0,0	Cr	0,0
CuO	0,0	Cu	0,0
Fe_2O_3	0,1	Fe	0,1
HfO_2	0,0	Hf	0,0
K_2O	0,0	K	0,0
MgO	0,1	Mg	0,1
Mn_2O_3	0,0	Mn	0,0
Na_2O	0,3	Na	0,2
NiO	0,0	Ni	0,0
P_2O_5	0,0	P	0,0
PbO	0,0	Pb	0,0
SO_3	0,2	S	0,1
SiO_2	0,3	Si	0,1
SrO	0,2	Sr	0,2
TiO_2	0,0	Ti	0,0
V_2O_5	0,0	V	0,0
WO_3	0,0	W	0,0
ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO_2	0,0	Zr	0,0
PAF =41,8%			

4.2.3. Analyse granulométrique

La Figure 4.3 illustre les tamis normalisés utilisés pour le tamisage des poudres de palourde obtenues après le processus de broyage qui a duré 25 minutes. Une série de tamis I.S.O. R-20 (International Standard Organization; R-20 : Série de Renard de module 20) a été utilisée. Les ouvertures normalisées sont les suivantes : 80-160-315-63 μm et 1,25-2,5-5-10-14-20-28-40-56-80 mm. Après le tamisage, les passants à chaque tamis ont été obtenus.



Figure 4.3. Analyse granulométrique de la poudre de palourde par tamisage

Les masses des refus et passants ont été rapportées à la masse initiale de la poudre (Tableau 4.3). Les pourcentages obtenus ont été exploités sous forme graphique pour tracer la courbe granulométrique (Figure 4.4). Cette poudre est caractérisée par une granulométrie étalée.

Tableau 4.3. Analyse granulométrique de la poudre de palourde

Diamètre tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
5	924	924	5	95
2,5	537	1461	7,9	92,1
1,25	884	2344	12,7	87,3
0,63	1467	3811	20,6	79,4
0,315	2682	6493	35,1	64,9
0,16	3740	10233	55,3	44,7
0,08	4355	14588	78,9	21,2

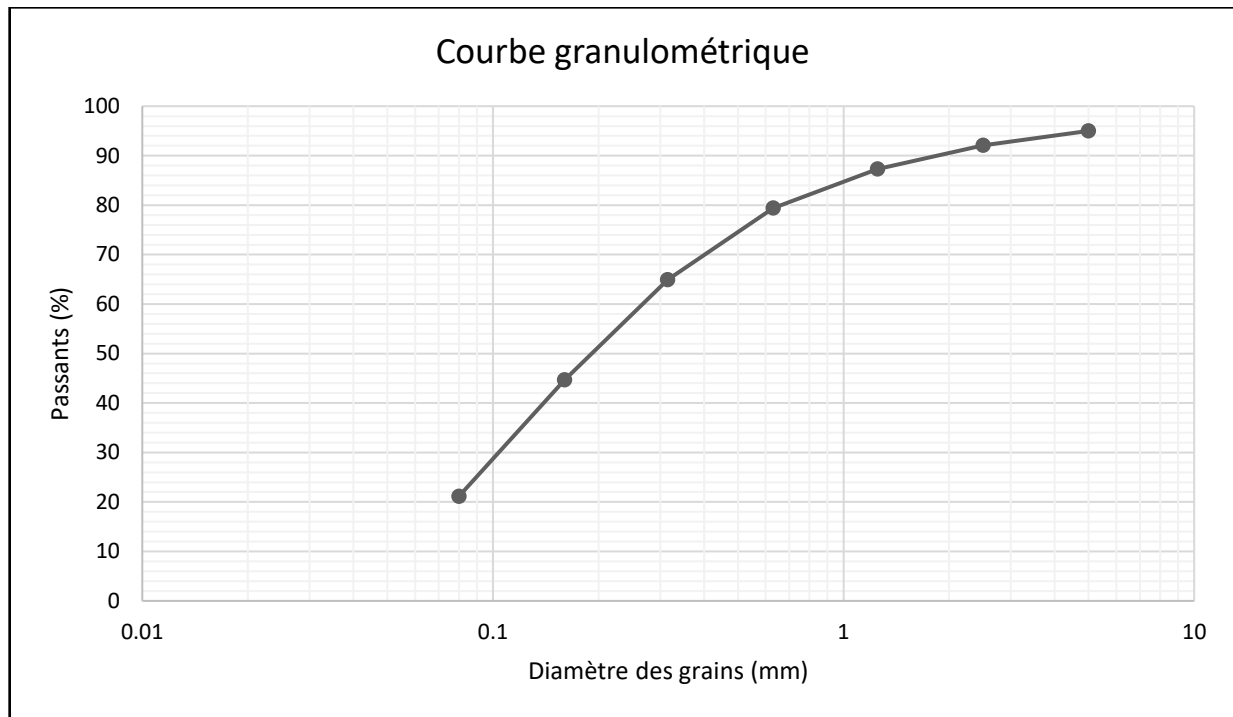


Figure 4.4 Courbe granulométrique de la poudre de palourde

En ce qui concerne la granulométrie des coquilles de palourde concassées (utilisées pour remplacer le sable naturel), les masses des refus et passants ont été rapportées à la masse initiale de la poudre (Tableau 4.4). Les pourcentages ainsi obtenus ont été exploités sous forme graphique pour tracer la courbe granulométrique (Figure 4.5). La courbe granulométrique du sable naturel, ainsi que les limites préconisées par la norme ASTM C33 et définissant le fuseau granulométrique ont été également tracés. Les deux courbes des sables sont situées dans le fuseau granulométrique. La caractérisation de la granulométrie se fait à l'aide de 2 coefficients :

Coefficient d'uniformité: $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$;

Coefficient de courbure : $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$;

Pour les granulats fins formés par les coquilles de palourde concassées, on a $D_{10} = 160 \mu\text{m}$, $D_{30} = 1300 \mu\text{m}$, $D_{50} = 900 \mu\text{m}$, $D_{60} = 1200 \mu\text{m}$. Donc, $C_u = 7,5$ et $C_c = 1,3$. On peut conclure que ces granulats fins se caractérisent par une granulométrie semi-étalée et bien graduée.

De surcroît, le Module de Finesse (MF) a été calculé. Ainsi, pour les coquilles de palourde concassées, on a $MF = 2,9$. De plus, pour le sable naturel, on $MF = 2,4$. Ces valeurs sont acceptables par la norme ASTM C33 qui préconise une valeur de MF entre 2,3 et 3,1 pour les granulats fins.

Tableau 4.4. Analyse granulométrique des coquilles de palourde concassées

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés	Passants
5	11	11	0%	100%
2,5	658	670	16%	84%
1,25	897	1567	38%	62%
0,63	1020	2586	62%	38%
0,315	900	3487	84%	16%
0,16	251	3738	90%	10%
0,08	277	4015	97%	3%

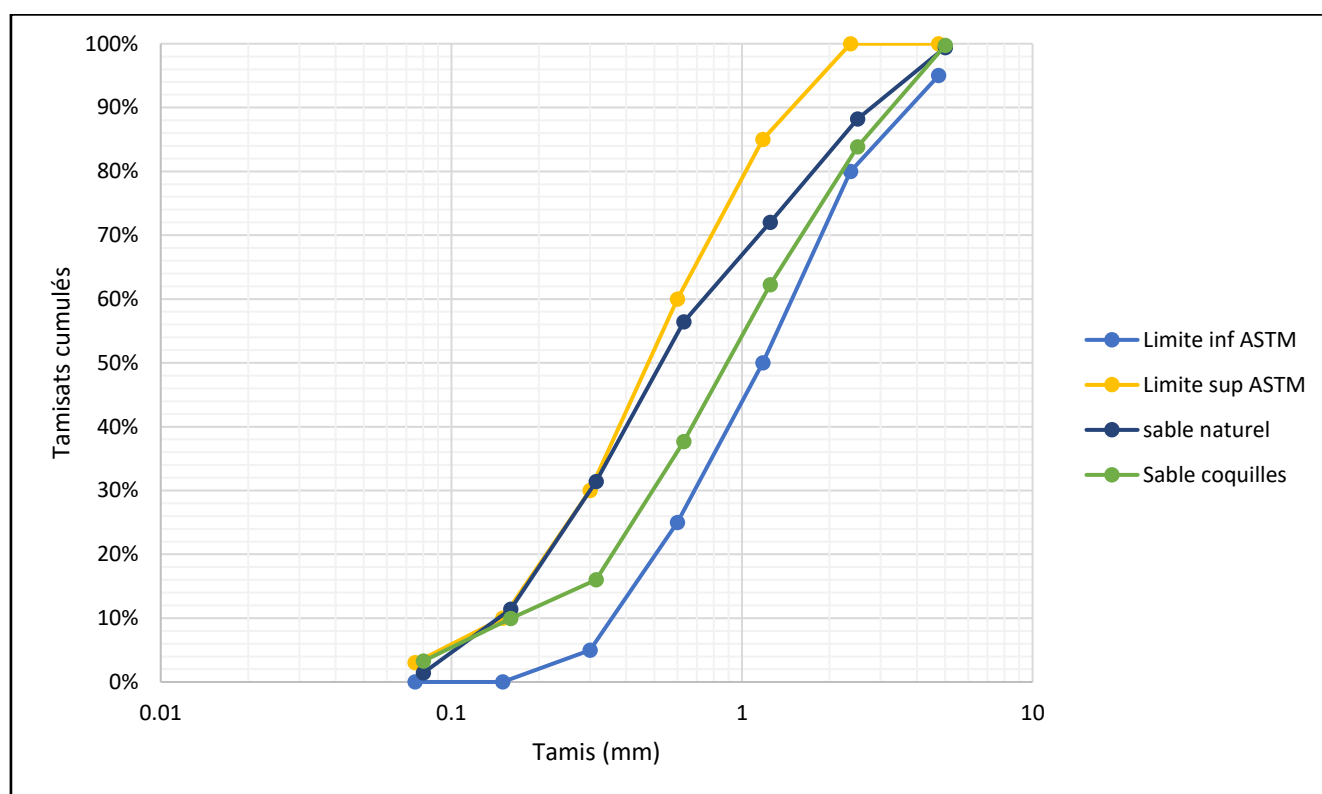


Figure 4.5. Courbe granulométrique des coquilles de palourde, du sable naturel et les courbes limites selon la norme ASTM C33

4.3. Formulations des pâtes de ciment

4.3.1. Effet du taux de remplacement de la poudre de palourde dans le ciment

L'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur 3 échantillons de chaque formulation des pâtes de ciment contenant la poudre de palourde brute (non calcinée) avec différents taux de remplacement. Les temps de cure de 7 et 28 jours ont été rallongés à 9 et à 34 jours.

Les résultats ont montré que l'augmentation du taux de substitution de la poudre de palourde a engendré une diminution de la résistance à la compression par rapport aux témoins. En effet, la réduction à 9 jours était de 10%, 26% et 33% pour des taux de remplacement respectifs de 5%, 10% et 15%. De même, la réduction à 34 jours était respectivement égale à 14%, 27% et 33%. On remarque que la diminution des résistances était constante en fonction du temps de cure. De surcroît, la plus faible diminution de résistance par rapport aux témoins a été atteinte pour un taux de remplacement de 5%.

La diminution de la résistance de la pâte de ciment pourrait être expliquée par l'absence des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques de la poudre et par la diminution de la quantité du ciment. La poudre de palourde a réagi comme un matériau de remplissage dans la matrice cimentaire. En conséquence, elle a joué le rôle d'une addition inerte permettant seulement de substituer une partie du ciment. Ces résultats étaient attendus et rejoignent ceux rapportés dans la littérature pour plusieurs types de coquilles et notamment pour les palourdes.

Le Tableau 4.5 et la Figure 4.6 compilent les résultats trouvés. À titre d'indication, les valeurs des résistances indiquées sont les moyennes de trois valeurs d'essais.

Tableau 4.5. Résistance à la compression des pâtes en fonction du taux du remplacement

Taux de remplacement	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Échéance	9 jours				34 jours			
Moyenne (MPa)	50,0	44,7	37,2	33,6	61,3	52,8	44,8	41,3
Diminution		10%	26%	33%		14%	27%	33%
Écart-type	3,59	2,32	1,01	1,28	0,97	1,58	1,75	1,28
Coefficient de variation (CV)	7%	5%	3%	4%	2%	3%	4%	3%

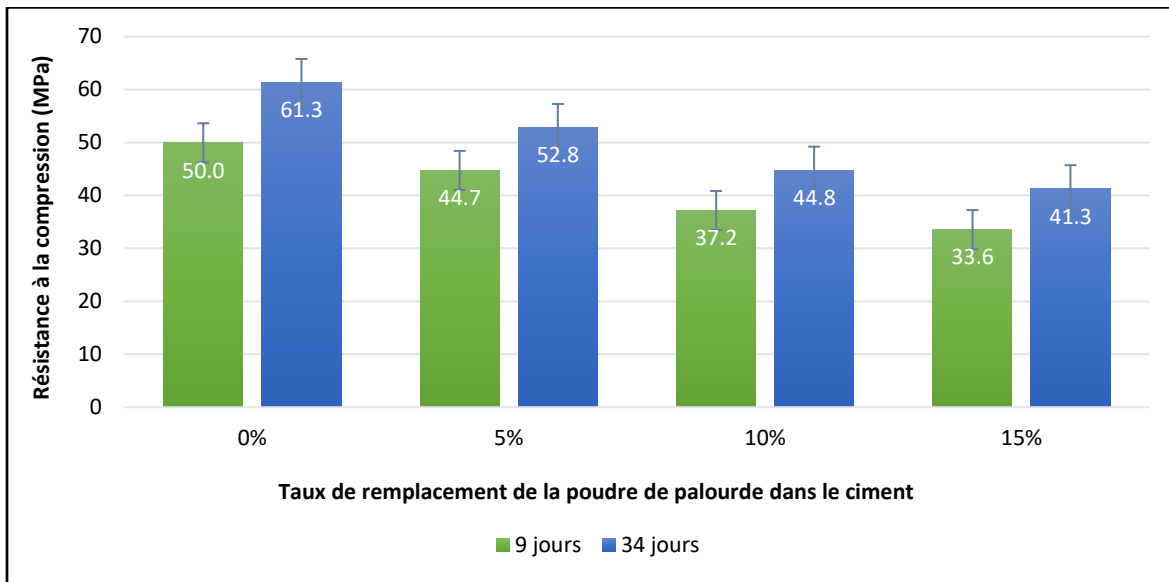


Figure 4.6. Variation de la résistance à la compression des pâtes de ciment en fonction de la durée de murissement et du taux de remplacement de la poudre de palourde brute non tamisée

4.3.2. Effet de la taille des particules de la poudre

L'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur 18 échantillons provenant des formulations des pâtes de ciment contenant la poudre brute tamisée en faisant varier la taille des particules de cette poudre. La résistance à la compression a été déterminée à 7 et à 28 jours. Le Tableau 4.6 et la Figure 4.7 illustrent les résultats. Les valeurs des résistances étaient sensiblement les mêmes pour les poudres qui correspondent à $D < 80 \mu\text{m}$ et $D < 160 \mu\text{m}$. On note également que pour ces poudres, on a eu des augmentations de la résistance moyenne avec le temps égales à 13% et 14% à 7 jours et à 28 jours. En revanche, pour les poudres correspondant à $D < 315 \mu\text{m}$ l'évolution de la résistance était minime. En outre, l'augmentation de la taille des particules de la poudre a induit une diminution de la résistance. En effet, les résistances les plus élevées ont été obtenues pour la poudre avec $D < 315 \mu\text{m}$.

On remarque que le coefficient de variation (CV) est grand, atteignant 38% pour les échantillons contenant la poudre correspondant à $D < 80 \mu\text{m}$, d'où la grande dispersion des résultats.

De surcroît, si on compare avec les résultats obtenus dans la section précédente, pour un taux de remplacement de la poudre égal à 5%, ces valeurs sont plus faibles. En effet, la résistance à la compression moyenne des mélanges précédents était respectivement égale à 45 MPa et 52 MPa, à 9 jours et à 34 jours. En conséquence, bien que les échéances ne soient pas les mêmes, il est clair que ces valeurs sont plus basses que celles des mélanges précédents.

Ces constatations montrent que ces résultats s'opposent à l'hypothèse de base selon laquelle plus la poudre est fine, plus la surface totale est grande, plus sa vitesse d'hydratation est importante et plus l'accroissement de la résistance est rapide. De plus, il a été démontré que la finesse des

poudres génère l'effet de remplissage tout en comblant les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment occupés généralement par l'eau. Ceci résulterait à des gains de résistances.

Tableau 4.6. Résistance à la compression des pâtes en fonction de la taille des particules de la poudre de palourde brute

Taille des particules de la poudre (μm)	D < 80	D < 160	D < 315	D < 80	D < 160	D < 315
Échéance	7 jours			28 jours		
Moyenne (MPa)	32,3	33,1	41,7	37,1	38,4	42,7
Écart-type	12,17	7,5	2,37	2,82	2,17	1,20
Coefficient de variation (CV)	38%	23%	6%	8%	6%	3%

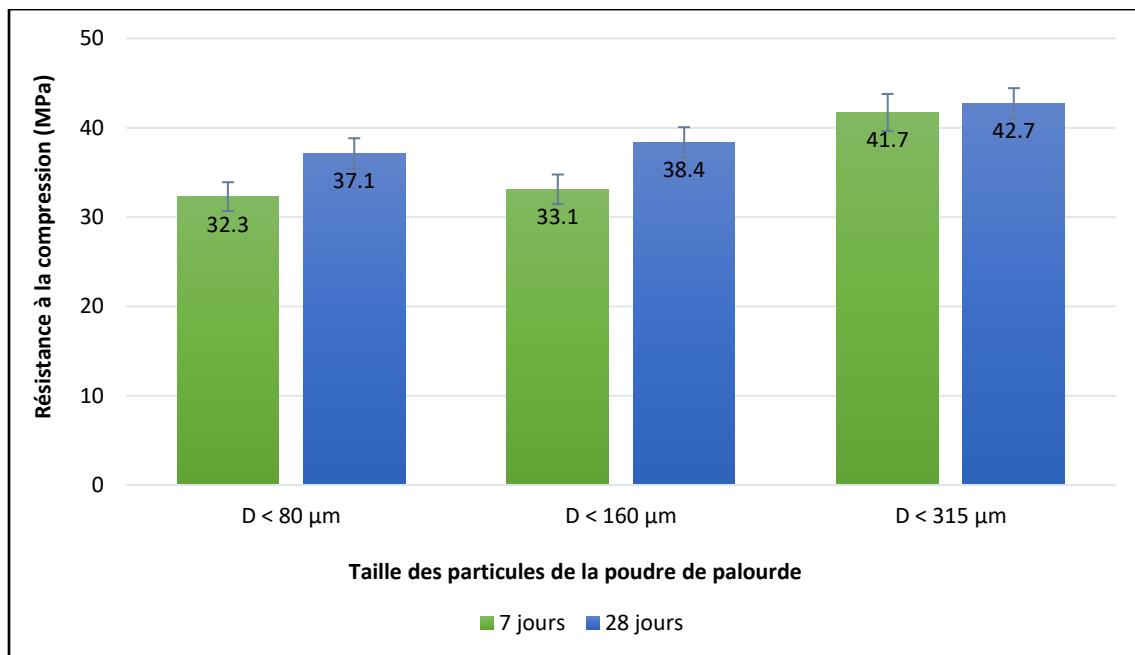


Figure 4.7. Résistance à la compression des pâtes de ciment en fonction de la durée de murissement et de la classe granulométrique de la poudre de palourde

Vu l'incohérence de ces résultats, ces mélanges ont été refaits. Ainsi, les mêmes formulations des pâtes de ciment ont été adoptées et la même procédure de malaxage, de mise en place et de cure a été suivie. La résistance à la compression a été déterminée à 7 jours et à 28 jours.

Contrairement aux résultats précédents, un gain des résistances moyennes a été observé, quand la poudre était plus fine, principalement à jeune âge. On souligne une augmentation de 24% de la résistance à 7 jours des pâtes contenant la poudre plus fine ($D < 80 \mu\text{m}$) par rapport aux pâtes contenant la poudre qui correspond à $D < 160 \mu\text{m}$ et $D < 315 \mu\text{m}$. Toutefois, à 28 jours, l'augmentation de la résistance moyenne des échantillons contenant une poudre correspondant

à $D < 80 \mu\text{m}$, était respectivement de 6% et 4%. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse de base et rejoignent les résultats rapportés dans la littérature. Cependant, vu la dispersion des résultats, cette augmentation s'avère plus ou moins représentative. Par conséquent, à la lumière de ces résultats, l'hydratation des pâtes était plus rapide à 7 jours pour les mélanges contenant les poudres les plus fines, mais à 28 jours c'est semblable vu la dispersion des résultats.

Ces résistances étaient plus élevées que celles obtenues antérieurement. En effet, à 7 jours, la résistance a augmenté respectivement de 43%, 23% et 3%, pour les poudres correspondant à $D < 80 \mu\text{m}$, $D < 160 \mu\text{m}$ et $D < 315 \mu\text{m}$. De même à 28 jours, une amélioration respective de la résistance de 40%, 34% et 29% a été observée.

Le Tableau 4.7 et la Figure 4.8 résument les résultats obtenus.

Tableau 4.7. Résistance à la compression des pâtes en fonction de la taille des particules de la poudre de palourde

Taille des particules de la poudre (μm)	D < 80	D < 160	D < 315	< 80	< 160	D < 315
Échéance	7 jours			28 jours		
Moyenne (MPa)	56,5	43,2	43,1	62,4	58,5	60
Écart-type	5,16	6,68	9	14,97	8,52	13,99
Coefficient de variation (CV)	9%	15%	21%	24%	15%	23%

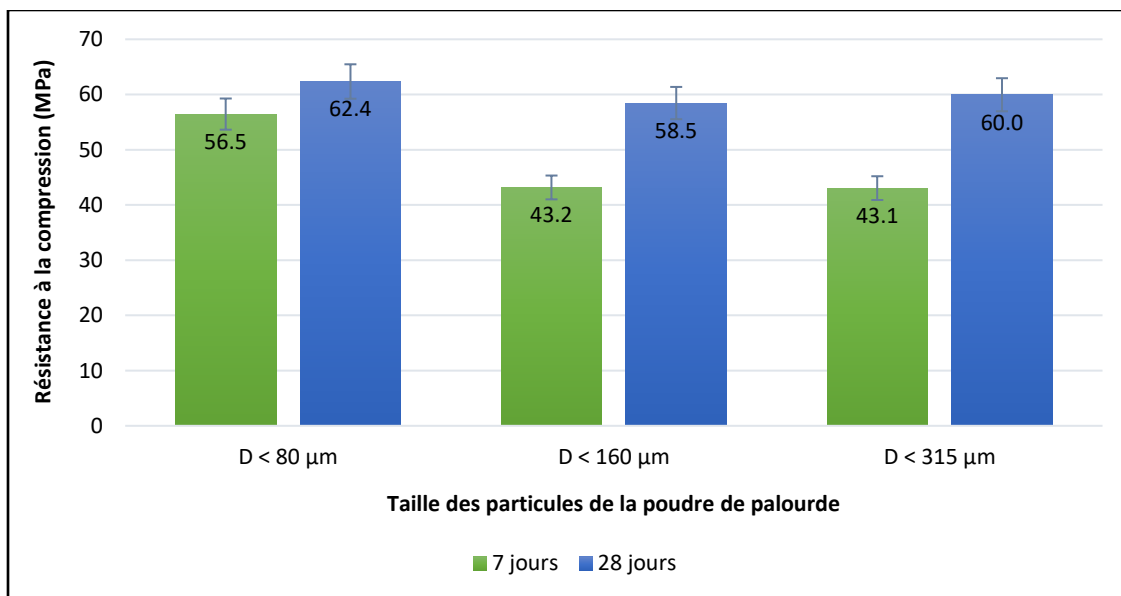


Figure 4.8. Variation de la résistance à la compression sous l'effet de la taille des particules de la poudre de palourde en fonction de la durée de murissement

4.3.3. Microstructure de la pâte de ciment hydratée

On a eu recours à une observation au MEB de 3 échantillons des deuxièmes mélanges de pâte de ciment hydratée, pour lesquels on a déterminé la résistance à la compression à 7 jours. Ces échantillons possédaient la même formulation, contenant 5% de la poudre de palourde non calcinée, tout en faisant varier la taille des particules de cette poudre. Cette observation a permis de visualiser la microstructure de la pâte de ciment.

A travers cette microscopie, différents produits d'hydratation tels que le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'ettringite ont été visualisés (Figure 4.9). En effet, le C-S-H, le principal produit d'hydratation qui développe la résistance de la pâte, se présentait sous forme d'un réseau de fibres très fines. De plus, une grande quantité de produits d'hydratation a été observée sous forme d'aiguilles qui est une morphologie typique de l'ettringite.

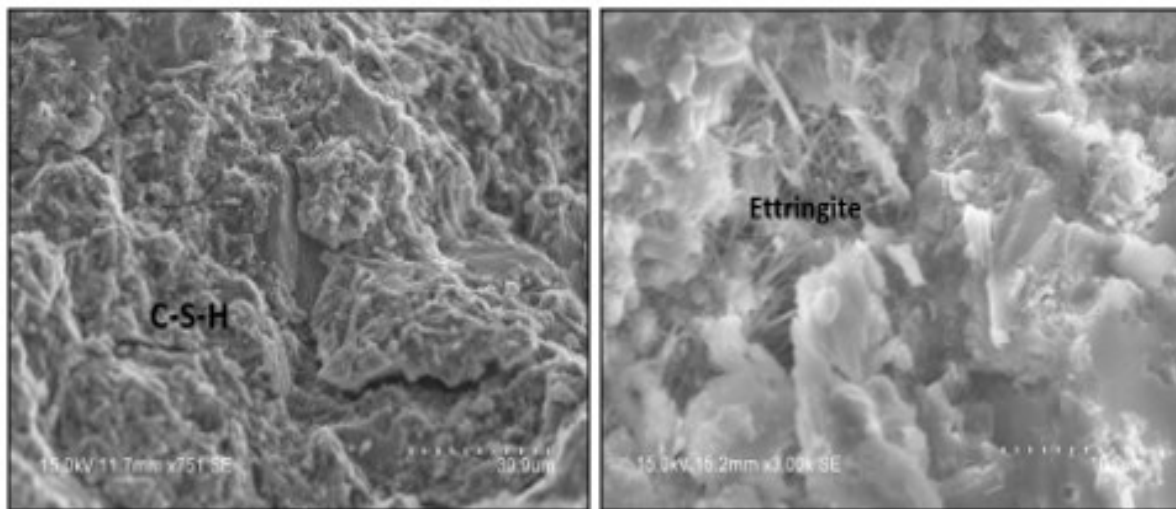


Figure 4.9. Photos du MEB de quelques phases d'hydratation dans la pâte de ciment

Il était difficile de distinguer la poudre de coquilles, surtout que le ciment a été remplacée par seulement 5% de poudre de palourde. De plus, on n'a pas remarqué une différence claire entre les 3 échantillons de pâtes visualisés, qui permet d'expliquer la variation des résistances à la compression de ces échantillons. Cependant, la forme de cette poudre a été identifiée. En effet, elle se présentait principalement sous des formes plates. Cette forme ne ressemble à aucune autre forme des produits d'hydratation de la pâte de ciment (Figure 4.10).

En outre, la poudre de palourde et les produits d'hydratation du ciment Portland existaient indépendamment et qu'il n'y avait pas de réaction chimique entre eux. Cette même morphologie a été également identifiée par Zhong et al. (2012). Ces résultats confirment que la poudre de palourde joue essentiellement le rôle d'un matériau de remplissage inerte.

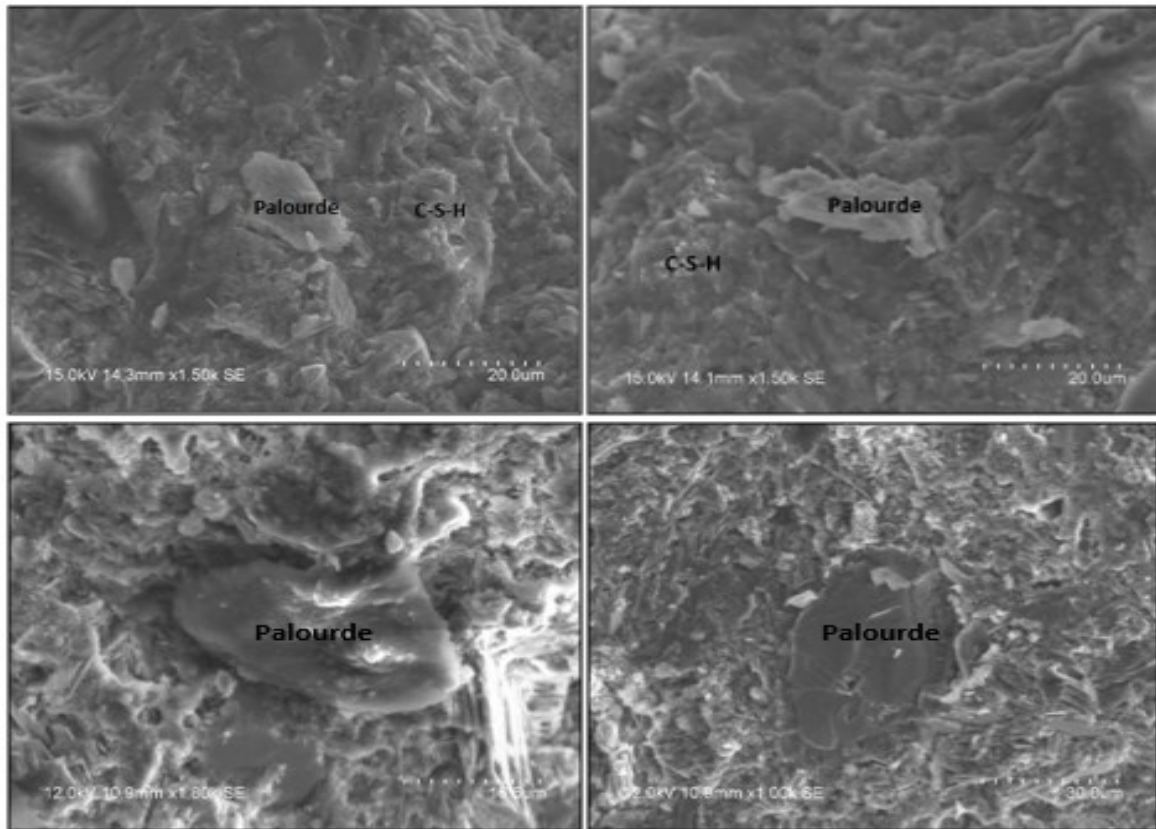


Figure 4.10. Photos du MEB des échantillons de poudres de coquilles

4.3.4. Effet de la calcination de la poudre

L'essai de compression a été réalisé sur 24 échantillons provenant des formulations des pâtes de ciment contenant la poudre calcinée à 800°C, en faisant varier le taux de remplacement de cette poudre de 0%, 5%, 10% et 15%. L'essai a été effectué à 9 et à 34 jours. Le Tableau 4.8 et la Figure 4.11 illustrent les résultats.

Les résultats ont montré que les résistances moyennes à 9 jours sont pratiquement égales à celles des témoins pour un taux de remplacement de 5%. En revanche, une réduction de 9% et de 12% a été notée pour des taux de remplacement respectifs de 10% et 15%. Toutefois, à 34 jours, une augmentation de 14% a été notée pour un taux de remplacement de 10%. Ce gain de résistance semble surprenant compte tenu des autres résultats et pourrait être attribué à une erreur. En effet, pour des taux de substitution respectifs de 5% et 15%, une diminution de la résistance moyenne de 7% et 16% a été constatée.

Ces résultats ont montré qu'il est difficile de trouver une tendance générale quant à l'effet de l'incorporation de la poudre de palourde, qu'elle soit calcinée ou pas. Cependant, on peut du moins suggérer un taux de remplacement acceptable de la poudre calcinée de 5%, permettant d'atteindre de bonnes performances proches de celles des pâtes de référence. De plus, on peut conclure, que les résistances moyennes à la compression obtenues avec la poudre calcinée ont

dépassé celles obtenues avec la poudre brute, surtout à 34 jours. Ainsi, à 9 jours, un accroissement respectif de 1%, 9% et 17%, a été noté pour des taux de remplacement de 5%, 10% et 15%. En revanche, à 34 jours une augmentation de 21%, 75% et 39% a été observée respectivement pour ces taux de remplacement.

Par conséquent, bien que qualifié d'ajout inerte, la poudre de palourde calcinée jouant le rôle d'un filler calcaire peut avoir une influence sur l'hydratation du ciment et les grains peuvent agir comme des sites de nucléation. Par conséquent, la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides pour précipiter est alors augmentée, d'où l'augmentation de la résistance (Husson, 1991; Larrard, 1999). Cet effet est accentué quand il s'agit de l'utilisation de la poudre calcinée. Ceci met en exergue l'effet de la calcination sur le développement des résistances des pâtes de ciment étant donné que la poudre calcinée est riche en chaux hydratée Ca(OH)_2 contrairement à la poudre brute qui est plutôt riche en carbonate de calcium CaCO_3 (Tayeh et al., 2019).

Tableau 4.8. Résistance à la compression des pâtes en fonction du taux de remplacement de la poudre calcinée

Taux de remplacement	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Échéance	9 jours				34 jours			
Moyenne (MPa)	44,4	44,1	40,5	39,1	68,7	63,8	78,2	57,4
Diminution		(-) 1%	9%	12%		7%	(-) 14%	16%
Écart-type	1,94	4,05	5,1	1,17	2,21	7,9	6,67	7,54
Coefficient de variation (CV)	4%	9%	13%	3%	3%	12%	9%	13%

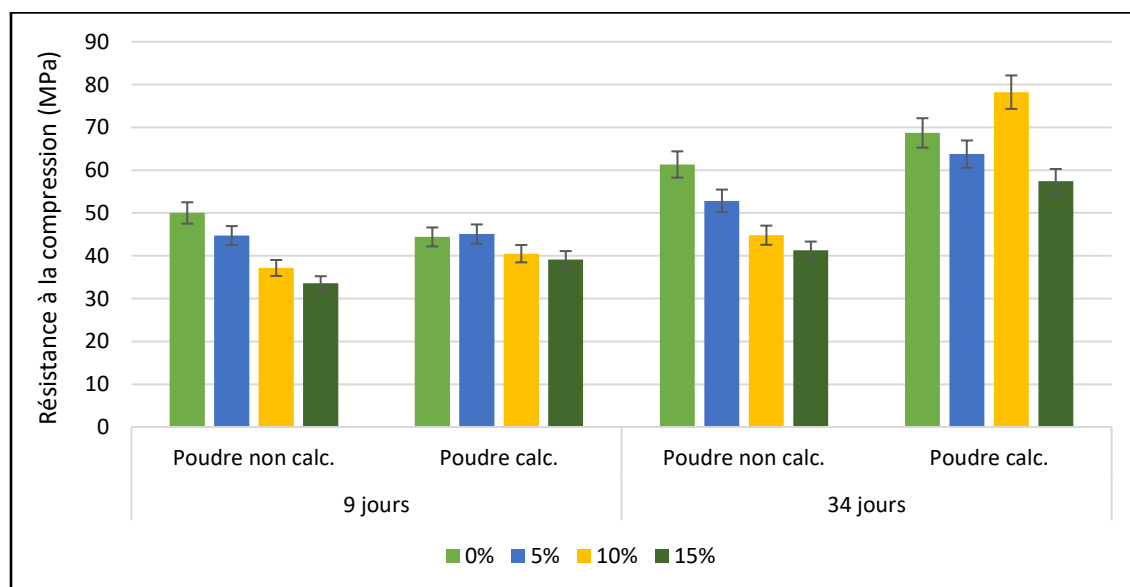


Figure 4.11. Résistance à la compression des pâtes de ciment contenant la poudre calcinée, en fonction de la durée de murissement et du taux de remplacement de la poudre de palourde

4.4. Formulations des mortiers

4.4.1. Taux du remplacement de la poudre de palourde dans le ciment

Les essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur 18 échantillons de mortier, à 7 et à 28 jours. La taille des particules de la poudre de palourde incorporée dans le ciment pour formuler les échantillons était comme suit : $[1/3 (D < 80 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 160 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 315 \mu\text{m})]$. En se basant sur les résultats précédents et compte tenu de la diminution considérable de la résistance pour un taux de remplacement de 15 %, le ciment a été remplacé par seulement 5% et 10% de poudre non calcinée. Le but ici était de comprendre l'effet de ces additions sur le développement des résistances des mortiers. Le Tableau 4.9 et la Figure 4.12 illustrent les résultats obtenus.

L'augmentation du taux de remplacement de la poudre de palourde a contribué à la diminution des résistances des cubes de mortiers par rapport aux témoins. Cette diminution était constante au fil du temps. En effet, pour un taux de remplacement de 5%, la résistance a diminué respectivement de 11% et 31%, à 7 jours et à 28 jours par rapport à celle des mortiers de référence. De même, l'incorporation de 10% de poudre dans le ciment a induit une réduction de la résistance de 12% et de 32% respectivement à 7 jours et à 28 jours. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Lertwattanaruk et al. (2012). Par conséquent, la poudre de palourde agit vraisemblablement comme un filler calcaire remplissant les pores au sein de la matrice cimentaire et éventuellement augmentant le volume de poudres dans les mortiers. Cependant, elle ne peut pas jouer le rôle d'une pouzzolane et ne possède pas des propriétés hydrauliques. Ainsi, en se basant sur la résistance à la compression, ces résultats mènent à suggérer que 5% est le taux de substitution le plus approprié en n'ayant pas eu recours à la calcination de la poudre.

Tableau 4.9. Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de remplacement de la poudre de palourde non calcinée

Taux de remplacement	0%	5%	10%	0%	5%	10%
Échéance	7 jours			28 jours		
Moyenne (MPa)	28,2	25,1	19,5	32,4	30,0	23,3
Diminution		11%	31%		7%	28%
Écart-type	0,8	0,4	0,8	5,1	3,0	1,0
Coefficient de variation (CV)	3%	2%	4%	16%	10%	5%

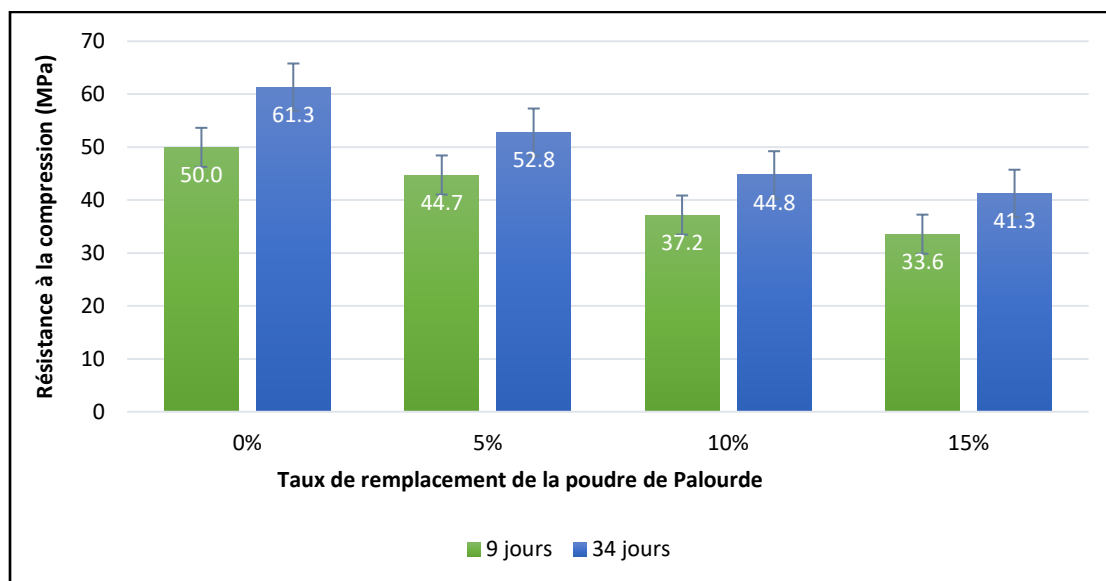


Figure 4.12. Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge et du taux de remplacement de la poudre de palourde non calcinée

4.4.2. Taux du remplacement du sable naturel par les coquilles de palourde

L'essai de compression uniaxiale a été effectué sur 3 échantillons de chaque formulation des mortiers contenant 5% de poudre de palourde brute (non calcinée) comme remplacement partiel du ciment avec différents taux de remplacement des coquilles concassées. L'essai a été réalisé à 7 et à 28 jours. Les échantillons contenant 100% de sable ordinaire ont été considérés comme des références. Le Tableau 4.10 et la Figure 4.13 illustrent les résultats obtenus.

Les résultats ont montré que l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par les coquilles de palourde a engendré une diminution significative de la résistance à la compression par rapport aux témoins. En effet, la réduction était de 30% et de 20%, respectivement à 7 et à 28 jours, pour un taux de remplacement égal à 50%. De plus, cette diminution était égale à 81% et 83% respectivement à 7 et à 28 jours, pour un taux de remplacement égal à 100% de sable naturel par les coquilles concassées.

Tableau 4.10. Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de remplacement du sable naturel par les coquilles de palourde

Taux de remplacement	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Échéance	7 jours			28 jours		
Moyenne (MPa)	57,8	40,4	10,7	69,0	55,5	11,7
Diminution		30%	81%		20%	83%
Écart-type	5,0	2,0	3,7	4,2	2,6	2,5
Coefficient de variation (CV)	9%	18%	9%	6%	22%	5%

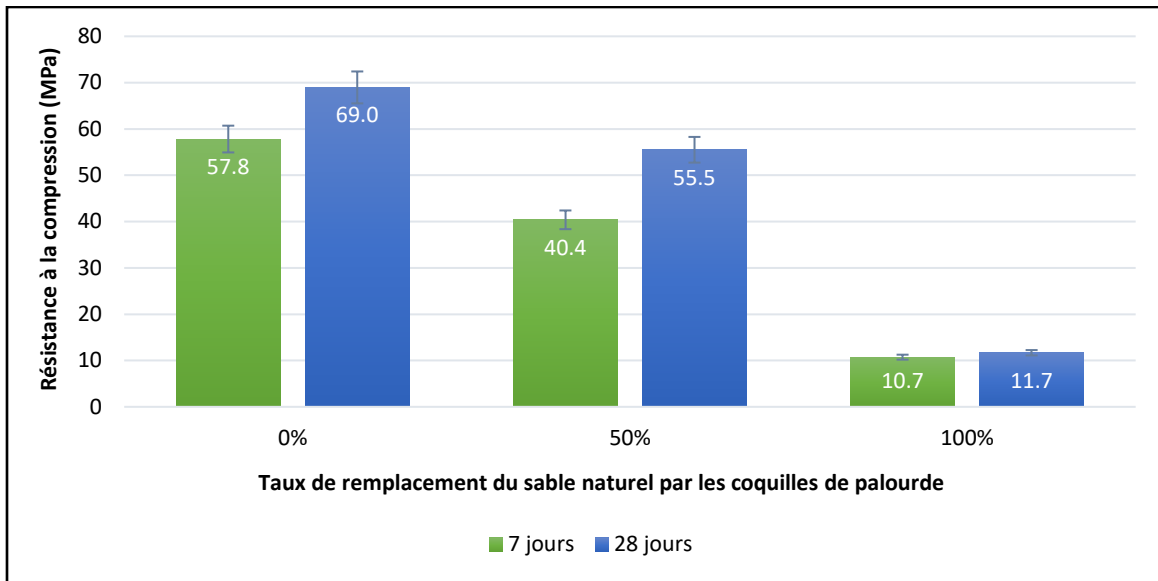


Figure 4.13. Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux du remplacement du sable naturel par les coquilles concassées

Les très faibles résistances obtenues pour les mélanges contenant 100% de coquilles de palourde concassées peuvent s'expliquer notamment par le fait qu'on a eu des problèmes lors de la formulation et la mise en place de ces mélanges dans les moules (Figure 4.14). En effet, une réduction importante de l'ouvrabilité des mortiers par rapport aux témoins a été observée. Ceci pourrait être dû à l'absorption d'eau plus élevée des coquilles par rapport au sable naturel utilisé ou bien à la forme allongée ou floconneuse des coquilles. D'ailleurs, ce phénomène a été souligné par plusieurs chercheurs (Eziefula et al., 2018). Pour pallier ce problème, il pourrait être envisageable d'augmenter la quantité d'eau, ou d'utiliser des adjuvants chimiques permettant d'atteindre de meilleures performances, avec un taux de remplacement du sable naturel par les coquilles de palourde concassées, ne dépassant pas 50% vu la baisse drastique de la résistance à la compression.



Figure 4.14. Mortiers contenant 100% de sable de coquilles

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce projet de recherche avait pour objectif principal la valorisation des coquilles de palourde et du sable de dragage provenant des IDM, dans les matériaux cimentaires, d'une façon simple et économique. L'approche méthodologique a été construite dans le but de formuler des pâtes de ciment et des mortiers tout en visant l'incorporation de ces résidus. Dans le cadre de ce chapitre, tous les résultats obtenus seront discutés et comparés avec ce qui a été publié dans la littérature.

La première partie de ce travail consistait à valoriser la poudre de palourde pour remplacer partiellement le ciment. Pour ce faire, on a commencé par la caractérisation minéralogique des coquilles qui a montré que leur principal composant est le carbonate de calcium. Cette composition est similaire au calcaire (Othman et al., 2013; Tayeh et al., 2019). Ainsi, les coquilles de palourde, tout comme la majorité des résidus marins, peuvent être classées comme un matériau inerte n'agissant pas chimiquement avec le ciment mais jouant le rôle de filler calcaire. D'ailleurs, ces résultats ont été montrés à travers la visualisation au MEB des pâtes de ciment hydratées contenant 5% de poudre. La poudre des coquilles se présentait sous des formes plates et elle existait indépendamment des produits d'hydratation du ciment Portland. Donc, il n'y avait pas de réaction chimique significative entre eux (Zhong et al., 2012). Toutefois, il aurait été souhaitable de visualiser au MEB des échantillons contenant un taux plus élevé de poudre de palourde afin de mieux évaluer son effet, car avec un taux de 5% il était difficile de distinguer cette poudre.

Les coquilles ont été broyées durant 25 minutes à l'aide du broyeur à boulets, jusqu'à obtenir une poudre. Aucun traitement préalable n'a été réalisé, contrairement à ce qui a été fait dans certains travaux de recherche. En effet, les chercheurs lavaient et séchaient les coquilles, avant de les incorporer comme matériau cimentaire afin de diminuer les impuretés présentes (Lertwattanaruk et al., 2012; Martínez-García et al., 2017; Olivia et al., 2015; Sandjaya et al., 2019).

Afin de valoriser la poudre de palourde, on a choisi d'étudier tout d'abord son comportement dans la pâte de ciment et voir son effet sur le développement des résistances à la compression. À cet effet, trois paramètres principaux qui sont le taux de remplacement, la taille des particules de la poudre de palourde et la calcination de la poudre, ont été variés. La résistance à la compression uniaxiale a été fixée comme étant la propriété primordiale pour optimiser ces paramètres. Le travail accompli dans le cadre de cette maîtrise est original, car peu ou pas d'études ont approché la problématique de l'effet de la poudre de coquilles sur les pâtes et les mortiers. En effet, la plupart des travaux ont eu tendance à évaluer l'effet de cette poudre directement sur le béton. De plus, le seul paramètre étudié était le taux de remplacement de cette poudre. Par conséquent notre travail s'avère être une avancée intéressante et originale.

La fabrication des pâtes et des mortiers en remplaçant partiellement le ciment par la poudre de palourde non calcinée a induit une diminution de la résistance à la compression à 7 et à 28 jours. Cette diminution a été rapportée par Sandjaya et al. (2019), qui ont utilisé la poudre de palourde brute. Ainsi, les chercheurs ont noté que 5% était le taux de remplacement acceptable permettant d'obtenir des résistances à la compression proches de celles des mélanges conventionnels. Ces résultats sont similaires à ce qu'on a obtenu. Soulignons que dans la grande majorité des travaux de recherche, les chercheurs ont opté pour une calcination de la poudre à des températures supérieures à 500°C, pour enlever la matière organique, ce qui a permis d'atteindre des meilleures performances. D'ailleurs, c'était le cas des résultats obtenus quand on a procédé à la calcination de la poudre à 800°C, où les résistances à la compression ont augmenté significativement, et ont même dépassé celles des échantillons de référence (une augmentation de 14% pour un taux de 10%, à 34 jours). Cette amélioration de la résistance est due à la teneur élevée en chaux vive qui accélère le développement des résistances. Dans ce contexte, Olivia et al. (2017) ont travaillé sur les palourdes provenant d'Indonésie et ont remarqué une légère augmentation de la résistance à la compression pour un taux de remplacement de 4%. Ils ont également montré que les poudres de palourde brûlées sont les plus prometteuses en termes de propriétés mécaniques des bétons formulés. Cela appuie les bons résultats des résistances obtenues. Toutefois, Lertwattanakul et al. (2012) ont rapporté que la substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles calcinée a engendré une légère diminution de la résistance à la compression et que les résistances les plus élevées ont été obtenues avec un taux de 5%. Dans la littérature, peu ou pas d'études ont combiné l'utilisation du sable de dragage et des coquilles pour produire des matériaux cimentaires.

De façon générale, l'incorporation de la poudre de coquilles dans le ciment pour produire des matériaux cimentaires induit une diminution de la résistance à la compression. Cette diminution est certes relative et dépend de plusieurs paramètres tels que la finesse et la distribution granulométrique de la poudre, la calcination, le rapport E/C, les conditions de la mise en place, etc. Elle pourrait être expliquée d'une part par la diminution de la quantité du ciment, surtout que cette poudre joue uniquement le rôle d'un matériau de remplissage, n'ayant pas des propriétés pouzzolaniques. Cela dit, cette poudre ne peut pas remplacer le ciment comme étant un liant hydraulique, mais pourrait contribuer à l'affinage des pores, ce qui peut améliorer les résistances à la compression. De surcroît, la baisse de la résistance pourrait être due aux particules de la poudre de palourde plus grosses que le ciment utilisé qui contient 97% de particules inférieures à 45 µm. En outre, la réduction des résistances peut être attribuée à l'absorption d'eau élevée de ces coquilles (Tayeh et al., 2019). A titre d'exemple, les superplastifiants peuvent être utilisés pour leurs propriétés dispersantes. Ainsi, l'ajout de superplastifiant facilite la mise en place des matériaux cimentaires tout en augmentant leur fluidité. Ils ont une influence considérable sur la structure de la pâte de ciment à l'état frais. En effet, les particules de ciment sont dispersées plutôt que floculées (Tagnit-Hamou, 2013).

À la lumière de ces résultats, on s'est trouvés face à un dilemme qui consistait à opter ou pas pour la calcination de la poudre durant les prochains mélanges. En fait, la calcination contribue à l'émission du CO₂ et elle est relativement coûteuse, ce qui va à l'encontre de notre objectif ultime qui est de formuler des mélanges écologiques et économiques. Donc, d'une part la calcination

donne des résistances moyennes à la compression similaires à celles des témoins (surtout pour un taux de remplacement de 5%). Cela est attribué à l'augmentation de la teneur en chaux hydratée dans la poudre calcinée et à la diminution de la quantité de matière organique à travers le chauffage (diminution de la perte au feu à la suite de la calcination). D'autre part, ce procédé libère du CO₂ et évidemment consomme de l'énergie ce qui conduit à des coûts supplémentaires à éviter. D'ailleurs, on a choisi de n'utiliser aucun adjuvant chimique justement pour minimiser les coûts des formulations. Le choix était, donc, de choisir de travailler avec la poudre non calcinée, ce qui permet de trouver un équilibre entre contraintes mécaniques, environnementales et économiques.

Une des limites de ce travail était la grande différence entre les gâchées, une grande dispersion avec un coefficient de variation atteignant 38% pour les échantillons contenant une poudre correspondant à $D < 80 \mu\text{m}$. La dispersion des résultats n'a pas été mentionnée dans les articles, où seules les valeurs moyennes ont été présentées.

Il est vrai que le taux de remplacement du ciment par la poudre des coquilles ne semble pas très élevé, et que ce travail ne propose pas un remplacement total du ciment par cette poudre cependant, à l'échelle planétaire cela aurait certainement un effet important. Autrement dit, si on arrive à diminuer la consommation du ciment dans tous les matériaux cimentaires formulés et si on admet que 1 t de ciment génère 0,8 t de CO₂ (Flower & Sanjayan, 2007), on contribuerait certes à une réduction des émissions du CO₂. Donc, ce sont ces petites substitutions qui aboutissent à des changements majeurs, surtout quand il s'agit d'une valorisation des déchets.

En ce qui concerne la taille des particules de la poudre de palourde, le choix était d'utiliser une poudre dont le diamètre des particules est comme suit : $[1/3 (D < 80 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 160 \mu\text{m}) + 1/3 (D < 315 \mu\text{m})]$, pour la plupart des formulations. Toutefois, dans la littérature, les auteurs ont opté pour d'autres choix. A titre d'exemple, Zaid & Ghorpade et al. (2014) ont utilisé une poudre avec $D < 90 \mu\text{m}$, ou encore Olivia et al. (2017) qui ont incorporé une poudre avec $D < 75 \mu\text{m}$. Il aurait été souhaitable d'utiliser une poudre avec une taille des particules similaire à celle du ciment ($D < 45 \mu\text{m}$). Ce qui permettrait à la poudre de s'insérer et combler les vides entre les particules du ciment.

La deuxième partie de ce travail de recherche consistait à utiliser les coquilles de palourde concassées pour remplacer les granulats fins dans les mortiers. Il aurait été souhaitable de formuler des bétons et d'utiliser les coquilles pour remplacer les granulats grossiers. Toutefois, la quantité dont on disposait était insuffisante. Donc, on a choisi de formuler des mortiers en remplaçant le sable naturel par ces coquilles, à des taux de remplacement de 50% et 100%, tout en substituant 5% du ciment par la poudre de palourde non calcinée. Les résultats ont montré une réduction de la résistance à la compression à 7 jours de 30% et 81% pour des taux de remplacement respectifs de 50% et 100%. Cette diminution était de 20% et 83% à 28 jours, pour ces taux de substitution. Cela est vraisemblablement dû à l'absorption d'eau élevée des coquilles par rapport à celle du sable naturel. D'ailleurs, il serait intéressant faire un essai d'absorption d'eau des coquilles qui pourrait expliquer cette diminution de la résistance. Des résultats similaires ont été rapporté par Chin-Peow et al.(2015) qui ont utilisé les moules pour remplacer le sable naturel. En effet, les chercheurs ont noté que la résistance à la compression des mortiers

a diminué respectivement de 49% et 77%, à 7 jours pour les taux de 50% et 100%. De même la résistance a diminué de 50% et 76% à 28 jours, pour ces taux de remplacement. Cette diminution a été attribuée à la géométrie des moules concassées possédant des arêtes vives et une surface lisse. Dans ce contexte, Edalat-Behbahani et al. (2019) ont rapporté une diminution de la résistance des mortiers contenant 100% de coquilles de coque concassées au lieu du sable ordinaire. La réduction était de 35% et de 18% respectivement à 7 et à 28 jours.

On tient à noter que jusqu'ici, on ne peut pas réellement conclure quant à l'effet de synergie entre la poudre de palourde pour le remplacement partiel du ciment et les coquilles concassées pour le remplacement du sable naturel.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce travail de recherche a été focalisé sur la valorisation dans les matériaux cimentaires des coquilles de palourde et du sable de dragage provenant des IDM. Ces matières résiduelles sont souvent jetées, créant une apparence inesthétique et une odeur désagréable. De plus, lorsque de grandes quantités des coquilles sont produites, elles peuvent causer de graves problèmes environnementaux. En outre, l'importance de ce travail réside dans la réduction de la dépendance excessive aux ressources granulaires naturelles. En effet, la possibilité de remplacer les matériaux de construction conventionnels par des matériaux alternatifs locaux a été mise en exergue. A cet effet, cette étude fait partie d'une vision de valorisation visant à produire des matériaux cimentaires présentant des avantages écologiques en permettant de recycler ces résidus et diminuer les émissions de gaz à effet de serre, économiques et socio-économiques en permettant de mettre sur pied une politique de développement durable.

L'objectif de la première phase a été atteint en caractérisant la poudre de palourde. Il en résulte que :

- La poudre des coquilles de palourde brute est formée majoritairement du carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de calcite et d'aragonite et du quartz (SiO_2). De plus, la poudre calcinée à 800°C est formée de calcite et de portlandite. Cette composition majoritaire en carbonate de calcium justifie l'utilisation de la poudre de palourde comme un filler calcaire dans le ciment.
- La poudre de palourde brute est formée de 93 % de CaCO_3 avec des traces de silice. En outre, la poudre calcinée est composée de 56% de chaux hydratée avec traces de silice.

À la suite des résultats de caractérisation, on a passé à la deuxième phase qui consistait à étudier l'effet du taux de remplacement du ciment, de la taille des particules de la poudre de palourde et de la calcination de cette poudre dans des mélanges de pâtes de ciment. A la lecture des articles traitant la valorisation des résidus marins, il a été ressorti un manque d'information sur leur influence sur les pâtes et sur la réaction d'hydratation. L'incorporation de la poudre dans la matrice cimentaire a montré que :

- Le remplacement partiel du ciment (5%, 10% et 15%) par la poudre de palourde non calcinée a engendré une diminution des résistances moyennes à la compression des pâtes par rapport aux témoins. En effet, à 9 jours, cette diminution était de 10%, 26% et 33% pour les taux de remplacement respectifs. En outre, à 34 jours, la réduction des résistances était respectivement de 14%, 27% et 33%. Par conséquent, ces résultats ramènent à suggérer 5% comme le taux de remplacement le plus approprié.

- La calcination de la poudre à 800°C a permis d'améliorer les résistances à la compression des pâtes. Ainsi, à 9 jours, un gain des résistances respectif de 1%, 9% et 17% a été noté, pour des taux de remplacement de 5%, 10% et 15%. De plus, l'augmentation à 34 jours était de 21%, 75% et 39% respectivement pour ces taux de remplacement. On suggère 5% comme le taux de substitution de la poudre calcinée le plus approprié permettant d'atteindre des résistances similaires à celles des témoins.
- La variation de la taille des particules de la poudre de palourde dans les pâtes de ciment ($D < 80 \mu\text{m}$, $D < 160 \mu\text{m}$ et $D < 315 \mu\text{m}$) a montré que l'hydratation était plus rapide à 7 jours pour les mélanges contenant les poudres les plus fines. Toutefois, cette variation n'a pas eu d'effet sur le développement des résistances à 28 jours.
- L'observation au MEB des échantillons des pâtes a montré que la poudre de palourde et les produits d'hydratation du CP existaient indépendamment dans la pâte. Cela montre que cette poudre joue essentiellement le rôle d'un matériau de remplissage inerte.

Les formulations des mélanges de mortiers, dans la troisième phase de ce travail, ont permis de confirmer certains résultats rapportés dans la revue bibliographique. Les essais élaborés révèlent les résultats suivants :

- Le remplacement partiel du ciment (5%, 10%) par la poudre de palourde non calcinée a induit une diminution des résistances à la compression des mortiers contenant 100% de sable de dragage, par rapport aux témoins. En effet, une diminution, à 7 jours égale à 11% et 31% pour des taux de remplacement respectifs a été notée. Une diminution à 28 jours respectivement de 7% et 28% a été observé. Ces résultats ramènent à suggérer que 5% est le taux de remplacement le plus approprié.
- Le remplacement du sable naturel par les coquilles concassées a réduit la résistance à la compression à 7 jours, de 30% et 81% pour des taux de remplacement respectifs de 50% et 100%. De même la résistance a diminué de 20% et 83% à 28 jours, pour ces taux de remplacement. Ces résultats ramènent à conclure que la substitution du sable naturel par les coquilles de palourde concassées n'est pas viable pour des taux de remplacement supérieurs à 50%.

Les points d'intérêts soulevés dans ce projet de recherche ont permis de mettre en évidence plusieurs pistes à suivre pour des recherches futures sur la valorisation des coquilles de palourde des IDM. À titre d'exemple, les possibles recherches que l'étude réalisée a permis de mettre en évidence et qui méritent d'être approfondies, peuvent être identifiées comme suit :

- Il serait intéressant d'arriver à confectionner des bétons en remplaçant une partie (5 à 10%) du ciment par la poudre de palourde, et le sable naturel par le sable de dragage.
- Il pourrait être envisageable de réaliser une analyse de cycle de vie ainsi qu'une analyse économique pour vérifier la viabilité des matériaux cimentaires proposés.

- Il semble impératif de réaliser des essais de durabilité pour tester la résistance et le comportement des matériaux formulés vis-à-vis des agressions externes (écaillage, cycles gel/dégel, perméabilité aux ions chlorure).
- Il serait intéressant d'optimiser la température de calcination.
- Il est recommandé de corriger la granulométrie du sable de dragage en incorporant des matériaux plus fins, ce qui va améliorer la compacité de la matrice en diminuant la porosité.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Adewuyi, A. P., & Adegoke, T. (2008). Exploratory study of periwinkle shells as coarse aggregates in concrete works. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3(6).
- Aitcin, P.-C. (2003). *Les liants hydrauliques : Le ciment du béton*.
- Ben Othman, R., El Euch, S., & Neji, J. (2014). *Béton de sable de dragage fibré*. JSFM-CMC.
- Chin-Peow, W., Poi-Ngian, S., Tahir, M. M., & Hong, A. K. B. (2015). Compressive Strength Of Ground Waste Seashells In Cement Mortars For Masonry And Plastering. *Applied Mechanics and Materials*, 727-728, 67-170.
- Edalat-Behbahani, A., Soltanzadeh, F., Emam-Jomeh, M., & Soltan-Zadeh, Z. (2019). Sustainable approaches for developing concrete and mortar using waste seashell. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Eo, S.-H., & Yi, S.-T. (2014). Effect of oyster shell as an aggregate replacement on the characteristics of concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 67(15), 833–842.
- Eziefula, U. G., Ezech, J. C., & Eziefula, B. I. (2018). Properties of seashell aggregate concrete : A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 192, 287–300.
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2016). *The State of World Fisheries and Aquaculture*.
- Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 12, 282-288.
- Husson, S. (1991). *Étude physicochimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

- Ingram, K. D., & Daugherty, K. E. (1991). Review of Limestone Additions to Portland Cement and Concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 13, 165-170.
- Ipavec, A., Gabrovsek, R., Vuk, T., Kaucic, V., Macek, J., & Meden, A. (2011). Carboaluminate Phases Formation During the Hydration of Calcite-Containing Portland Cement. *The American Ceramic Society*, Vol. 94, 1238–1242.
- Khankhaje, E., Rafieizonooz, M., Salim, M. R., Mirza, J., Salmiati, & Hussin, M. W. (2017). Comparing the effects of oil palm kernel shell and cockle shell on properties of pervious concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 10, 383–392.
- Larrard, F. (1999). *Structures granulaires et formulation des bétons*. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées.
- Légaré Bilodeau, C., Durbecq, T., Thibodeau, M., & Tita, G. (2011). *Identification de scénarios de valorisation des matières résiduelles critiques aux Îles-de-la-Madeleine*.
- Lertwattanakul, P., Makul, N., & Siripattaraprat, C. (2012). Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. *Journal of Environmental Management*, Vol. 111, 133-141.
- Limeir, J., Agulló, L., & Etxeberria, M. (2012). Dredged marine sand as construction material. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 16(8), 906–918.
- Martínez-García, C., González-Fontboa, B., Martínez-Abella, F., & Carro- López, D. (2017). Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 139, 570-583.

Mohammad, W. A. S. B. W., Othman, N. H., Wan Ibrahim, M. H., Rahim, M. A., Shahidan, S., &

Abd Rahman, R. (2017). A review on seashells ash as partial cement replacement. *IOP Publishing, Vol. 271*.

Nguyen, D. H., Boutouil, M., Baraud, F., & Leleyter, L. (2017). Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials, Vol.135*, 137–150.

Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L., & Baraud, F. (2013). Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials, Vol. 49*, 151-160.

Nkrumah, E., & Dankwah, J. R. (2016). Recycling Blends of Rice Husk Ash and Snail Shells as Partial Replacement for Portland Cement in Building Block Production. *Ghana Journal of Technology, Vol. 1(1)*, 67-74.

Olivia, M., Mifshella, A. A., & Darmayanti, L. (2015). *Mechanical properties of seashell concrete. Vol. 125*, 760-764.

Olivia, M., Oktaviani, R., & Ismeddiyanto. (2017). *Properties of concrete containing ground waste cockle and clam seashells. Vol. 171*, 658-663.

Othman, N. H., Abu Bakar, B. H., Don, M. M., & Johari, M. A. M. (2013). Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete. *Malaysian Journal of Civil Engineering, Vol. 25(2)*, 201-211.

Otunyo, A. W., Friday, I. U., & Israel, T. A. (2013). Exploratory Study of Crushed Periwinkle Shell as Partial Replacement for Fine Aggregates in Concrete. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS), Vol. 4(6)*, 823-827.

- P. Adewuyi, A., O. Franklin, S., & A. Ibrahim, K. (2015). Utilization of Mollusc Shells for Concrete Production for Sustainable Environment. *International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 6*(9).
- Safhi, A. el M. (2020). *Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplacants : Optimisation de la formulation* [Thèse en cotutelle Franco-Canadienne]. IMT Lille Douai, Université de Sherbrooke.
- Sandjaya, A., Tavio, & dan D, C. (2019). *Experimental Study of Mortar Compressive Strength with Anadara Granosa Powder as a Substitute for Partial Use of Cement. Vol. 650.*
- Tagnit Hamou, A. (1995). *Microstructure et physico-chimie des ciments et des betons.*
- Tagnit-Hamou, A. (2013). *Les liants hydrauliques : GCI710.*
- Tang, W., & Cui, H. (2017). Mechanical and Durability Properties of Concrete Using Dredged Marine Sand. *Materials Science Forum, Vol. 890*, 406-410.
- Tayeh, B. A., Hasaniyah, M. W., Zeyad, A. M., & Yusuf, M. O. (2019). Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement : A review. *Journal of Cleaner Production, Vol. 237.*
- UNEP, G. E. A. S. (GEAS). (2014). *Sand, Rarer Than One Thinks;*
- Varhen, C., Carrillo, S., & Ruiz, G. (2017). Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials, Vol. 136*, 533-544.
- Wang, J., Liu, E., & Li, L. (2019). Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials. *Journal of Cleaner Production, Vol. 220*, 235-252.

- Yang, E.-I., Kim, M.-Y., Park, H.-G., & Yi, S.-T. (2010). Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 758–765.
- Yang, E.-I., Yi, S.-T., & Leem, Y.-M. (2005). Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics : Part I. Fundamental properties. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2175 – 2182.
- Yoon, G.-L., Kim, B.-T., Kim, B.-O., & Han, S.-H. (2003). Chemical–mechanical characteristics of crushed oyster-shell. *Waste Management*, Vol. 23, 825–834.
- Yusof, M., Ujai, S. J. J., Sahari, F., Taib, S. N. L., & Mohamed, N. H. N. (2011). Application of Clam (Ilokan) Shell as Beach Retaining Wall. *Proceedings of EnCon2011*. 4th Engineering Conference, Kuching, Sarawak, Malaysia.
- Zaid, S. T., & Ghorpade, V. G. (2014). Experimental Investigation of Snail Shell Ash (SSA) as Partial Replacement of Ordinary Portland Cement in Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3(10).
- Zhong, B.-Y., Zhou, Q., Chan, C.-F., & Yu, Y. (2012). Structure and Property Characterization of Oyster Shell Cementing Material. *Chinese J. Struct. Chem.*, Vol. 31, 85-92.
- Zri, A., Abriak, N. E., & Benzerzour, M. (2009). *Etude de formulation d'un béton de sable à base de sable de dragage*. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Hammamet Tunisie.

